



La théorie des graphes pour analyser la transparence écologique des infrastructures de transport

Paul Rodrigues

► To cite this version:

Paul Rodrigues. La théorie des graphes pour analyser la transparence écologique des infrastructures de transport. Géographie. 2014. dumas-01113795

HAL Id: dumas-01113795

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01113795>

Submitted on 14 Feb 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Aix-Marseille Université
UFR ALLSH Pôle Géographie, Aménagement, Environnement
UMR 7300 ESPACE - CNRS

LA THÉORIE DES GRAPHS POUR ANALYSER LA TRANSPARENCE ÉCOLOGIQUE DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT

Mémoire de Master 2 de Géographie
Spécialité : Structures et Dynamiques Spatiales

Soutenu le 05 / 09 / 2014

Paul RODRIGUES

Responsables :
Vincent LAPERRIERE
Patricia DETRY

Jury composé de :

Patricia DETRY, Ingénieur de l'agriculture et de l'environnement – Urbaniste, CEREMA
Sébastien GADAL, Professeur des Universités en géographie, Aix-Marseille Université
Vincent LAPERRIERE, Maître de conférences en géographie, Aix-Marseille Université

Ce mémoire a obtenu la note de	17 / 20
Date : 05 / 09 / 2014	

Signature du directeur de recherche

*Construire, c'est collaborer avec la terre :
c'est mettre une marque humaine sur un paysage
qui en sera modifié à jamais*

Marguerite Yourcenar

Insertion de la recherche dans le cadre d'un stage

Nom de l'institution et du service :

Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA)

Nom du maître de stage :

Patricia DETRY, Ingénieur de l'agriculture et de l'environnement - Urbaniste

Composition de l'équipe :

Agnès ROSSO-DARMET, Chef du service Infrastructures et Environnement

Patricia DETRY, Ingénieur de l'agriculture et de l'environnement - Urbaniste

Bertrand BOUTEILLES, Chargé d'études en géomatique

David LUNAIN, Chargé d'études bruit

Stéphane CHEMINAN, Chargé d'études qualité de l'air

Paul RODRIGUES, stagiaire Master 2 Géographie

Source de financement :

Le CEREMA est un établissement public financé par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.

Ce travail a été élaboré dans la continuité du programme de recherche ITTECOP 2 déjà réalisé par le CEREMA, fruit d'une réflexion collective. Ce mémoire est un travail personnel réalisé au sein de la structure et sous la tutelle de Patricia DETRY.

Remerciements personnels

J'exprime toute ma gratitude à ma tutrice, *Patricia Detry*, qui a su me guider tout au long de ce travail. Un grand merci pour tous ces précieux conseils qui ont participé à l'aboutissement de ce mémoire.

Je suis très reconnaissant envers mon directeur de mémoire, *Vincent Laperrière*, pour sa disponibilité, son encadrement, sa relecture et ses nombreuses recommandations.

Je remercie le CEREMA (Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement) qui m'a accueilli dans ses locaux. J'adresse également mes plus sincères remerciements à l'ensemble du service Infrastructures et Environnement. Un merci tout particulier à *Agnès Rosso-Darmet*, qui s'est assurée du bon déroulement de mes travaux, et *Bertrand Bouteilles* pour le partage de ses connaissances.

Un grand merci aux membres du jury *Patricia Detry*, *Vincent Laperrière* et *Sébastien Gadal*.

Merci à *Élisabeth* et *Pauline* pour la relecture qui a permis d'achever ce travail.

Merci à tous mes amis et ma famille pour leur soutien moral et intellectuel.

Sommaire

REMERCIEMENTS PERSONNELS	8
SOMMAIRE	9
INTRODUCTION	13
CHAPITRE 1 : LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT : UN ENJEU ENVIRONNEMENTAL LIÉ À LA BIODIVERSITÉ	17
1.1 LES NOUVEAUX ENJEUX DE BIODIVERSITÉ EN FRANCE	18
1.1.1 Évolutions politiques des enjeux liés à la sauvegarde de la biodiversité	18
1.1.2 La coexistence des réseaux de transports et écologiques	24
1.1.3 D'importants services écosystémiques impactés par la fragmentation	27
1.2 L'APPORT DE L'ÉCOLOGIE DU PAYSAGE DANS L'ANALYSE DE LA FRAGMENTATION DES HABITATS.....	30
1.2.1 Notions de base en écologie du paysage.....	30
1.2.2 La fragmentation : un enjeu majeur.....	34
1.2.3 Certaines lacunes pour mesurer la fragmentation.....	36
1.3 LE PROGRAMME ITTECOP : LES JUMELAGES DE LA RN 113 ET PROJET DE CONTOURNEMENT AUTOROUTIER D'ARLES	39
1.3.1 Le concept de jumelage.....	39
1.3.2 Différents territoires concernés	43
1.3.3 Une évolution des paysages de la Camargue et de la Crau peu considérable depuis le 19 ^e siècle.....	47
CHAPITRE 2 : ANALYSER LA TRANSPARENCE ÉCOLOGIQUE DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT AVEC LES GRAPHES PAYSAGERS.....	51
2.1 IDENTIFICATION DES ENJEUX	51
2.1.1 Les unités paysagères.....	51
2.1.2 Un territoire diversifié	53
2.1.3 De nombreux enjeux paysagers et environnementaux : de nombreux habitats concernés.....	59
2.1.4 Le choix d'une espèce cible : les chiroptères.....	62
2.2 DIFFÉRENTES APPROCHES POSSIBLES.....	65

2.2.1	<i>Difficulté d'une approche diachronique</i>	65
2.2.2	<i>La théorie des graphes</i>	68
2.3	CARTOGRAPHIE DU PAYSAGE POUR LA MISE EN PLACE D'UN MODÈLE D'ANALYSE BASÉ SUR LA THÉORIE DES GRAPHS	70
2.3.1	<i>Sources de données et premiers traitements</i>	70
2.3.2	<i>Cartographie du paysage de l'espèce cible pour les graphes paysagers</i>	74
2.4	MISE EN PLACE DES GRAPHS PAYSAGERS POUR L'ESPÈCE CIBLE	80
2.4.1	<i>Étape préliminaire</i>	81
2.4.2	<i>Définition des nœuds</i>	81
2.4.3	<i>Définition des liens</i>	83
2.4.4	<i>Finalisation du graphe</i>	86
CHAPITRE 3 : ANALYSER LA TRANSPARENCE ÉCOLOGIQUE À TRAVERS LA CONNECTIVITÉ DES HABITATS		91
3.1	RÉSEAUX DE TRANSPORTS ET RÉSEAU ÉCOLOGIQUE : UNE DIFFICULTÉ À COEXISTER	92
3.1.1	<i>Distance inter-tâche : première mesure de la connectivité des habitats</i>	92
3.1.2	<i>Importance de la prise en compte du paysage dans le modèle</i>	95
3.1.3	<i>Des fonctionnalités amputées, certaines connexions à rétablir</i>	97
3.2	ANALYSE DE LA CONNECTIVITÉ DES HABITATS	100
3.2.1	<i>Définition des métriques de connectivités et premières analyses</i>	100
3.2.2	<i>Importance des tâches dans le modèle : les delta-métriques</i>	105
3.2.3	<i>Impacts du projet de contournement</i>	108
3.2.4	<i>Analyse de sensibilité : distance d'impacts et effets de jumelage</i>	112
3.3	DISCUSSIONS DES RÉSULTATS ET PERSPECTIVES	118
3.3.1	<i>Discussion des résultats</i>	118
3.3.2	<i>De nombreux services écosystémiques impactés</i>	120
3.3.3	<i>Prise en compte de l'intégralité des habitats et des espèces</i>	123
CONCLUSION		127
RÉFÉRENCES		131
BIBLIOGRAPHIE		131
SITOGRAPHIE		141

ANNEXES	143
ATLAS CARTOGRAPHIQUE.....	151
TABLE DES ILLUSTRATIONS	173
ANNEXES.....	173
CARTES	173
FIGURES.....	174
GRAPHIQUES.....	175
PHOTOGRAPHIES.....	175
TABLEAUX.....	176
LISTE DES ACRONYMES	179

INTRODUCTION

La fin du XIXe siècle, avec notamment la révolution industrielle, a été un tournant dans l'histoire de l'humanité. Les besoins économiques et sociaux accrus des sociétés, couplés à une certaine vision du développement économique et social, mettent au second plan la protection de l'environnement et du milieu dans lequel nous vivons. Pourtant, l'étalement urbain, l'intensification des activités agricoles, la déforestation ou encore la densification des infrastructures de transport contribuent à la diminution de la biodiversité et limitent les déplacements des populations animales et végétales en fragmentant le territoire [Foltete J.-C., 2012]. Plus particulièrement, l'accroissement de la mobilité des personnes et des biens, concept qui se place comme une composante essentielle de l'organisation des espaces par nos sociétés, et donc synonyme de prospérité, a participé à l'augmentation de l'empreinte écologique humaine.

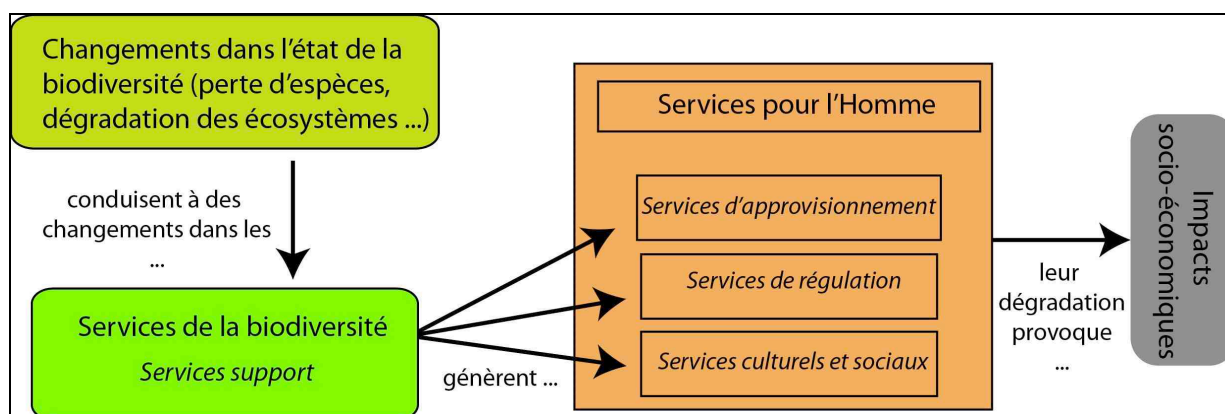
Pourtant, la protection de la biodiversité présente de nombreux enjeux. Chaque espèce est unique et sa disparition est irréversible pouvant, de plus, avoir des conséquences « *en cascade* » sur d'autres espèces. Par exemple, la disparition des grands prédateurs marins comme les requins a engendré la prolifération de méduses. Aujourd'hui, les interactions entre et à l'intérieur des écosystèmes ne sont pas encore bien connues d'autant plus que seulement 14 % des espèces seraient connues [Mora C. et al., 2011]. Par ailleurs, la diversité des espèces ainsi que leur diversité génétique permettent au vivant de s'adapter aux changements qu'ils soient climatiques ou encore économiques [Hubert-Vincent F., 2007 ; Kremer A., 2000]. Enfin, la biodiversité rend de nombreux services essentiels à l'homme comme l'approvisionnement de matière première, la régulation de certains phénomènes (climatiques, physico-chimique, etc.) ou encore certains services à caractère social comme le tourisme [Bolund P. & Hunhammer S., 1999 ; Cork S. et al., 2012].

Cependant, les activités anthropiques ont d'importants impacts sur la biodiversité et leurs effets multi-scalaires [André P. et al., 2003] apparaissent aujourd'hui comme un enjeu incontournable pour nos sociétés. Depuis les années 70, les préoccupations environnementales ne cessent de s'accroître et de nombreuses avancées politiques et scientifiques voient le jour. Plus particulièrement, l'écologie du paysage vise à analyser l'évolution, la structure et les dynamiques tout en tenant compte de l'hétérogénéité des espaces et en partant du principe que

« les activités humaines sont le principal facteur d'évolution des paysages au niveau planétaire ». [Burel F. & Baudry J., 1999]. Cette discipline met en avant deux théories : la fragmentation et la connectivité [Debray A., 2011]. C'est donc dans cette optique que le Grenelle de l'Environnement, avec notamment la Trame Verte et Bleue (TVB), outil d'aménagement du territoire qui se décline via les Schémas Régionaux de Cohérence Écologique (SRCE), tend à restaurer un réseau écologique cohérent sur le territoire français et vise à assurer la survie des espèces animales et végétales.

Ainsi, faire coexister le réseau routier et le réseau écologique sur l'ensemble du territoire est un objectif majeur des politiques liées au développement durable : « les grandes infrastructures linéaires de l'État et de ses établissements publics sont compatibles avec les orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques (...) et précisent les mesures permettant d'éviter, de réduire et le cas échéant, de compenser les atteintes aux continuités écologiques que la mise en œuvre de ces documents de planification de projets, notamment les grandes infrastructures linéaires, sont susceptibles d'entraîner » [Loi Grenelle II du 12 juillet 2010, Art. L. 371-2]. La transparence écologique des infrastructures de transport est prioritaire pour le développement durable et vise à préserver et restaurer les continuités écologiques pour la sauvegarde de la biodiversité. L'intérêt pour l'homme est multiple avec une biodiversité qui rend de nombreux services souvent indispensables (Figure 1).

Figure 1 Relation entre les changements liés à la biodiversité et les impacts socio-économiques



D'une part, l'identification des enjeux en termes de paysage et de biodiversité se place comme une réelle problématique ; d'autre part, la coexistence des réseaux écologiques et de transport implique de qualifier les fonctionnalités impactées et de définir comment restaurer les continuités écologiques. Comment dans ce cas, à partir d'une démarche

hypothético-déductive basée sur les connaissances du paysage et les préférences écologiques de l'espèce, peut-on analyser la transparence écologique des infrastructures de transport ?

Le sujet de mon stage au sein du CEREMA a donc porté sur la qualité de la transparence écologique à apporter aux infrastructures de transport. Deux grands objectifs ont été identifiés. D'une part, il s'agira de qualifier les fonctionnalités des écosystèmes perturbés. D'autre part, il sera pertinent de tenter d'identifier les services écosystémiques impactés. On peut, d'ores et déjà, supposer que les nouvelles infrastructures de transport perturbent les écosystèmes et impactent les fonctionnalités ainsi que l'ensemble des services rendus par ces écosystèmes. Par ailleurs, il se peut que le jumelage des infrastructures de transport soit une solution pour limiter les effets néfastes de la mise en place d'une nouvelle infrastructure.

Afin d'analyser la transparence écologique des infrastructures de transport, il s'agira dans un premier temps d'analyser dans quel contexte se place cette étude. À partir des nombreuses réglementations puis des différents concepts liés à l'écologie du paysage, l'intérêt de cette problématique ainsi que le choix du terrain d'étude sera justifié dans le présent rapport. Puis, après avoir identifié les différents enjeux paysagers liés à la biodiversité, une méthodologie basée sur la théorie des graphes permettra d'analyser la transparence écologique des infrastructures de transport ciblées. Enfin, les différents résultats seront exposés et confrontés à d'autres études sur le sujet et permettront de valider ou d'infirmer les hypothèses précédemment émises.

Chapitre 1 : Les infrastructures de transport : un enjeu environnemental lié à la biodiversité

L'empreinte humaine marque de plus en plus le paysage et l'environnement et est devenue alarmante. Par exemple, « *les zones artificialisées occupent près de 5 millions d'hectares en 2012, soit près de 9,1 % de la métropole. La moitié correspond à des sols revêtus ou stabilisés (routes, parkings). Les espaces artificialisés se sont étendus d'environ 400 000 hectares entre 2006 et 2012, en grande partie aux dépens de terres agricoles, mais aussi de milieux semi-naturels* » (CGDD, 2014). L'accroissement démographique, économique et social couplé aux récentes découvertes scientifiques en est en partie responsable avec des impacts qui peuvent être très importants et parfois irréversibles. Plus précisément, les infrastructures de transport sont considérées comme le premier facteur de fragmentation des paysages [Burel F. et Baudry J., 1999], phénomène qui perturbe le bon fonctionnement des écosystèmes et participe à l'érosion de la biodiversité. Cependant, l'intérêt pour ce sujet et les nombreuses problématiques qui en découlent sont récents. Aujourd'hui, on ne cesse d'affirmer l'importance de la conservation de l'environnement et la sauvegarde de la biodiversité.

Dans ce chapitre, il s'agit de présenter les enjeux en termes de biodiversité en France, à travers les différentes avancées politiques et scientifiques. Puis différentes notions liées à l'écologie du paysage seront abordées afin de mieux cerner le concept de fragmentation. Enfin, l'intérêt du terrain d'étude sera exposé à travers les enjeux liés au programme de recherche ITTECOP.

1.1 Les nouveaux enjeux de biodiversité en France

Le développement durable ou encore la protection de la biodiversité sont des concepts qui ont pris, depuis plusieurs années, une importance croissante. Les scientifiques et les politiques tentent aujourd'hui de lier les enjeux socio-économiques et les enjeux écologiques. Cette partie vise donc à analyser l'évolution des enjeux politiques et scientifiques liés à la biodiversité. Puis, les différents impacts des infrastructures de transport sur la biodiversité sont décrits à travers la littérature et permettent de comprendre l'intérêt de faire coexister les réseaux de transport et écologique. Enfin, il s'agit d'identifier les différents services écosystémiques qui peuvent être impactés par les infrastructures de transport et plus précisément par le processus de fragmentation des habitats.

1.1.1 Évolutions politiques des enjeux liés à la sauvegarde de la biodiversité

Jusqu'à présent il était acquis que les infrastructures de transports et les réseaux associés permettent le bon fonctionnement des territoires et assurent leur développement économique et social. Cependant, l'intensification des activités anthropiques, que l'on observe depuis plus d'un siècle, contribue à la diminution de la biodiversité, à la fragmentation des habitats des populations animales et végétales ainsi qu'à la limitation des flux de populations animales et végétales [Foltete J.-C. & al., 2012]. Malgré ces constats, il faut attendre le milieu des années 70, durant lesquelles, « avec la montée des préoccupations environnementales, les avancées scientifiques, notamment liées à l'écologie du paysage, mettent en lumière les avantages des corridors écologiques afin d'enrayer la perte de biodiversité. » [Cormier L. et al., 2010]. En parallèle, de multiples textes politiques (Tableau 1) voient le jour, à l'échelle internationale comme nationale, avec comme principal objectif d'enrayer la perte de biodiversité ainsi que de limiter les impacts de l'homme et retrouver les bénéfices rendus par les services écosystémiques.

Tableau 1 Les grandes procédures réglementaires nationales et internationales

Réglementations	Définition
Convention de RAMSAR Adoptée le 02/02/1971 Entrée en vigueur le 21/12/1975	Traité intergouvernemental qui incarne les engagements de ses États membres à maintenir les caractéristiques écologiques de leurs zones humides d'importance internationale et à planifier « l'utilisation rationnelle », ou utilisation durable, de toutes les zones humides se trouvant sur leur territoire.
Loi sur la protection de la nature Adoptée le 10/07/1976	<ul style="list-style-type: none"> - Protection des espèces : liste nationale d'espèces protégées ; - Prise en compte de l'environnement : <ul style="list-style-type: none"> o études d'impact pour infrastructures o statut pour l'animal (domestique) o protection des espaces o forêts de protection o création du statut de réserve naturelle, réserve naturelle volontaire o création du statut d'Arrêté Préfectoral de Protection de Biotope.
Convention de Bonn Adoptée le 23/06/1979 Entrée en vigueur le 01/11/1983	Traité international visant à protéger les espèces animales migratrices regroupées en une liste annexée.
Convention de Berne Adoptée le 19/09/1979 Entrée en vigueur le 01/06/1982	La Convention vise à promouvoir la coopération entre les États signataires, afin d'assurer la conservation de la flore et de la faune sauvages et de leurs habitats naturels de l'Europe, et protéger les espèces migratrices menacées d'extinction en l'Europe.
Arrêtés nationaux espèces protégées Insectes : 23/04/07. Poissons : 08/12/88. Amphibiens et reptiles : 19/11/07. Oiseaux : 29/10/09. Mammifères : 23/04/07. Espèces de vertébrés protégées menacées d'extinction : 09/07/99 modifié. Végétaux : 20/01/82 modifié.	<p>Art. L. 411-1 et suivants du Code de l'environnement prévoit un système de protection stricte des espèces de faune et de flore sauvages dont les listes sont fixées par arrêté ministériel.</p> <p>Sont interdits :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la destruction ou l'enlèvement des œufs ou des nids, la mutilation, la destruction, la capture ou l'enlèvement, la perturbation intentionnelle, la naturalisation d'animaux de ces espèces ou, qu'ils soient vivants ou morts, leur transport, leur colportage, leur utilisation, leur détention, leur mise en vente, leur vente ou leur achat (sauf spécimen légalement détenu avant l'interdiction); - la destruction, la coupe, la mutilation, l'arrachage, la cueillette ou l'enlèvement de végétaux de ces espèces, de leurs fructifications ou de toute autre forme prise par ces espèces au cours de leur cycle biologique, leur transport, leur colportage, leur utilisation, leur mise en vente, leur vente ou leur achat, la détention de spécimens prélevés dans le milieu naturel (sauf spécimen légalement détenu avant l'interdiction); - la destruction, l'altération ou la dégradation du milieu particulier à ces espèces animales ou végétales ; - la destruction des sites contenant des fossiles permettant d'étudier l'histoire du monde vivant ainsi que les premières activités humaines et la destruction ou l'enlèvement des fossiles présents sur ces sites.

Réglementations	Définition
Convention de Rio Adoptée le 19/09/1992 Entrée en vigueur le 29/12/1993	Traité international adopté lors du sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, avec trois objectifs principaux : <ul style="list-style-type: none"> - la conservation de la biodiversité ; - l'utilisation durable de ses éléments ; - le partage juste et équitable des avantages découlant de l'exploitation des ressources génétiques.
Directive 92/43/CEE dite habitats, faune, flore Adoptée le 21/05/1992	Mesure prise par l'Union européenne afin de promouvoir la protection et la gestion des espaces naturels et des espèces de faune et de flore à valeur patrimoniale que comportent ses États membres, dans le respect des exigences économiques, sociales et culturelles.
Directive 79/409/CEE dite Oiseaux Adoptée le 02/04/1979 Mise à jour et codifié le 30/11/2009	Mesure prise par l'Union européenne afin de promouvoir la protection et la gestion des populations d'espèces d'oiseaux sauvages du territoire européen
Directive 2000/60/CE Cadre sur l'eau (DCE) Adoptée le 23/10/2000	Directive européenne du Parlement européen et du Conseil qui établit un cadre pour une politique globale communautaire dans le domaine de l'eau
Directive (2004/35) Responsabilité Environnementale Adoptée le 21/04/2004	Première réglementation européenne strictement fondée sur le principe « pollueur/payeur »
Loi sur l'eau et les milieux aquatiques (Lema) Adoptée le 30/12/2006	Afin de répondre aux objectifs de gestion équilibrée et durable de la ressource en eau, certaines Installations, Ouvrages, Travaux et Activités (IOTA) sont soumis à autorisation ou à déclaration par les services déconcentrés de l'Etat. Les seuils de déclenchement de l'autorisation ou de la déclaration sont définis dans une nomenclature qui procède ainsi à une répartition entre les IOTA en fonction de leurs dangers et de la gravité de leurs effets sur la ressource en eau et les écosystèmes aquatiques
Loi Grenelle I Adoptée le 11/02/2009 Complétée par la loi Grenelle II du 12/07/2012	Le Grenelle a placé la biodiversité au cœur des débats, l'Etat s'engage alors à : <ul style="list-style-type: none"> - élaborer, d'ici fin 2012, une trame verte et bleue reliant les grands ensembles du territoire, pilotée en région avec les collectivités locales et les acteurs, dans un cadre cohérent défini par l'État. - renforcer la stratégie nationale pour la biodiversité (SNB) ; - mettre en place dans les cinq ans des plans de conservation ou de restauration pour protéger les 131 espèces végétales et animales en danger critique d'extinction ; - affirmer le principe de valorisation des services rendus par la biodiversité ; - acquérir par les collectivités publiques 20000 hectares de zones humides pour les préserver de l'artificialisation ; - réduire l'empreinte environnementale des infrastructures et équipement de transport afin de contribuer à maintenir ou recréer un environnement respectueux de la santé et de la biodiversité.

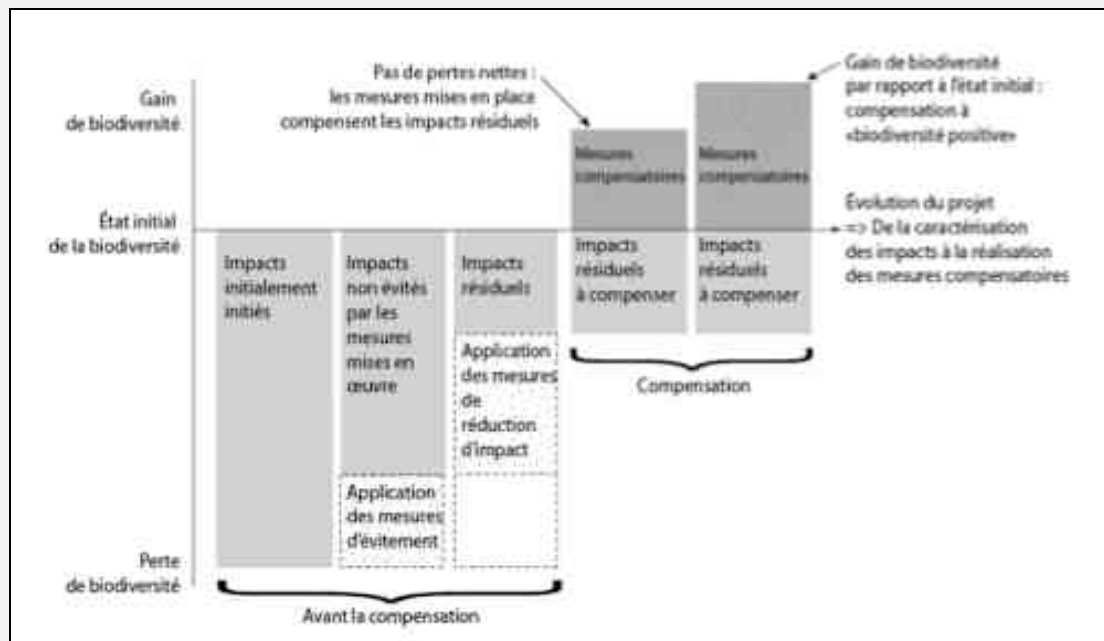
La loi de la protection de la nature de 1976 se place comme une base nationale dans la protection de la nature et la sauvegarde de la biodiversité. Durant cette même année, la séquence « éviter, réduire, compenser » (encadré « Éviter, réduire, compenser » : qu'est ce que c'est ?) est mise en place autour de l'ensemble des thématiques de l'environnement. Elle vise à appliquer le principe de « zéro perte nette » de biodiversité (Graphique 1).

« Éviter, réduire, compenser » : qu'est ce que c'est ?

La séquence « éviter, réduire, compenser » se résume en cinq point (Graphique 1) :

- le porteur de projet doit **éviter** toute atteinte à la biodiversité ;
- si les atteintes sont inévitables, des **mesures de réduction** doivent être instaurées pour toutes les phases du cycle de vie du projet ;
- en dernier recours, les impacts dits résiduels (non évités ou réduits) doivent être **compensés** ;
- en complément, des **mesures additionnelles de conservation** peuvent être appliquées ;
- dans tous les cas, il est impératif de mettre en place des **mesures de suivi** des actions d'évitement, de réduction et de compensation afin d'évaluer l'impact sur le long terme et le respect de l'objectif de « zéro perte nette ».

Graphique 1 hiérarchisation des mesures d'évitement, d'atténuation et de compensation (Source : CEREMA, ex-Sétra et al., 2011)



En 1992, la convention de Rio a marqué une prise de conscience internationale. Document clé en termes de développement durable, il a pour objectif de développer des stratégies nationales pour la conservation et l'utilisation durable de la diversité génétique. En 2000, le rapport du Millenium Assessment a mis en avant la notion de coût et d'impact sur le bien-être de l'Homme engendrés par les perturbations des écosystèmes qui s'opèrent depuis plus de 50 ans. En 2005, la charte de l'environnement intègre dans la constitution le fait que les politiques doivent promouvoir le développement durable et énonce les principes de prévention, de précaution et de pollueur-payeur.

Aujourd'hui, l'approche par la protection des espèces et la définition des aires protégées ne suffisent plus. Le Grenelle de l'Environnement, adoptée en 2009, a apporté une nouvelle stratégie et a renforcé les engagements de la France pris en 2004 avec la Stratégie Nationale pour la Biodiversité (SNB), notamment en ce qui concerne la question de la trame écologique. Pour respecter ses engagements et participer à la préservation et la gestion des continuités biologiques, la mise en place de la Trame Verte et Bleue (TVB), issu du Grenelle II, se place comme un outil majeur. Son but est de « *permettre aux espèces animales et végétales, de circuler, de s'alimenter, de se reproduire, de se reposer... En d'autres termes, d'assurer leur survie, et permettre aux écosystèmes de continuer à rendre à l'homme leurs services* » [<http://www.trameverteetbleue.fr>]. Pour cela, il est nécessaire de préserver et de restaurer les continuités écologiques sur un réseau d'échanges cohérent, notamment à travers 7 grands objectifs :

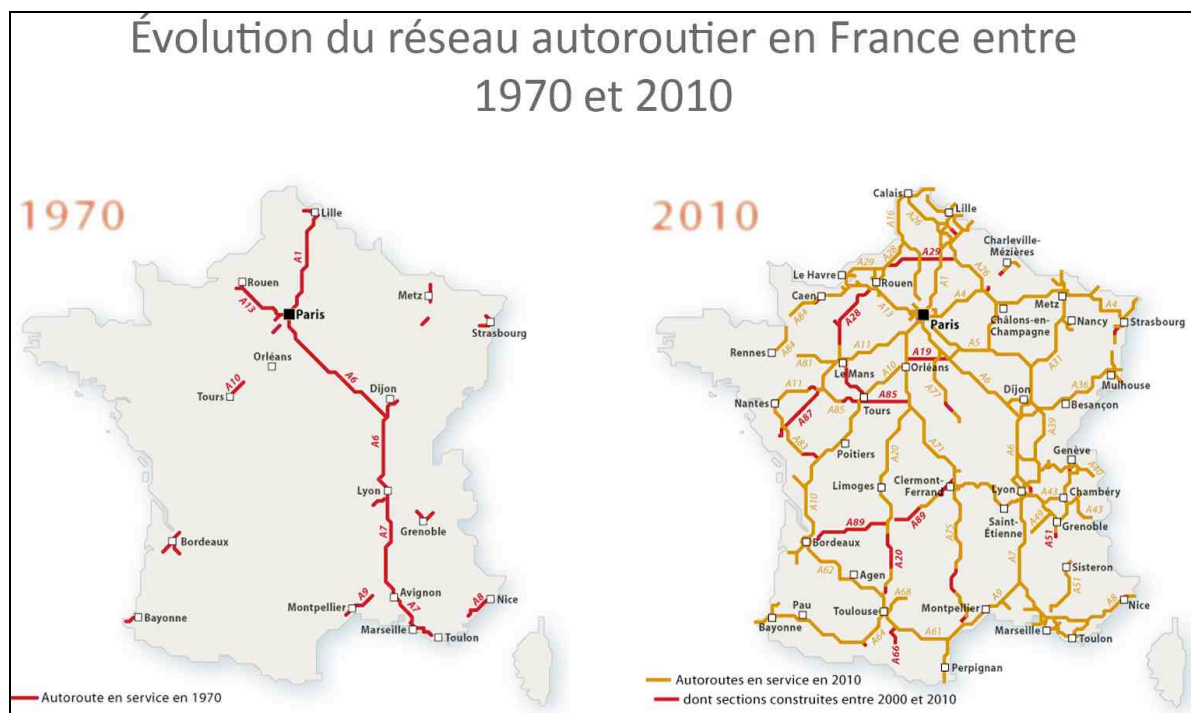
- réduire la fragmentation des habitats
- permettre le déplacement des espèces et préparer l'adaptation au changement climatique
- assurer des corridors écologiques entre les espaces naturels
- atteindre le bon état des eaux
- faciliter la diversité génétique
- prendre en compte la biologie des espèces sauvages
- améliorer la qualité et la diversité des paysages.

Les engagements, internationaux et nationaux, ont tenté de maintenir et/ou de (re)constituer des réseaux écologiques sans tenir compte du concept de « *fonctionnalité d'un territoire* ». En effet, « *le territoire fonctionnel n'a pas de limites géographiques rigoureuses et immuables* » [CEREMA, ex-Sétra, 2000], ces limites varient et évoluent en fonction du temps et de l'espace.

Le territoire français, notamment, bénéficie d'un territoire avec l'une des plus grande diversité de paysages, d'habitats et d'espèces d'Europe. Aujourd'hui, le Grenelle affirme la nécessité de sauvegarder un réseau biologique fonctionnel et de reconstituer un réseau écologique cohérent à l'échelle nationale. Dans les faits, la Trame Verte et Bleue est mise en œuvre à l'échelle régionale par le Schéma Régional de Cohérence Écologique (SRCE) et est déclinée à une échelle plus fine pour chaque territoire. Lorsque les SCoT et PLU existent, les SRCE y sont intégrés. L'ensemble des documents réglementaires est donc mis en place sur plusieurs échelles afin de tenir compte des spécificités de chaque territoire.

Malgré l'ensemble de ces efforts, le réseau d'infrastructures de transport n'a cessé de se densifier ces dernières décennies. En France, par exemple, la longueur des autoroutes était inférieure à 1000 km en 1970 et s'étale sur plus de 11 412 km en 2009 (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2009), soit plus de 11 fois plus en 40 ans (Figure 2). Le réseau routier quant à lui s'étale aujourd'hui sur plus d'un million de kilomètres. Cette importante évolution a des impacts importants sur l'environnement, les écosystèmes et la biodiversité, accentuant la fragmentation des habitats qui a pour principale conséquence « la diminution de la quantité d'habitat disponible pour les espèces par l'isolement des populations animales et végétales et la diminution de la taille des tâches » [CEREMA, ex-SÉTRA et al., 2012]. C'est devenu un enjeu majeur avec comme problématique principale la réalisation, le maintien et la compatibilité du réseau de transport et du réseau écologique.

Figure 2 Évolution du réseau autoroutier en France entre 1970 et 2010



Ainsi, c'est au cœur de toutes ces réglementations que les travaux du CEREMA (Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement) se placent. Cet établissement public est le résultat de la fusion de onze services du Ministère de l'Égalité des territoires et du Logement et du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, soit :

- les huit CETE (Centre d'Études et Techniques de l'Équipement)
- le CERTU (Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques)
- le CETMEF (Centre d'Études Techniques, Maritimes et Fluviales)
- le SETRA (Services d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements)

Il permet de disposer d'un appui scientifique et technique qui, par une approche transversale au service de l'égalité des territoires, a pour objectif de mettre en place des politiques publiques de l'aménagement et du développement durable. Plus précisément, le service Infrastructures et Environnements (IE), auquel j'ai été affecté, vise à aborder les problématiques environnementales et écologiques liées aux infrastructures de transports.

1.1.2 La coexistence des réseaux de transports et écologiques

Les infrastructures de transport, que ce soient les réseaux routiers et autoroutiers, les réseaux ferrés, les réseaux de transport d'électricité ou encore les réseaux éoliens, se sont largement développées durant le dernier siècle et, couplées au développement économique et démographique, se sont densifiées. Agissant comme des barrières parfois infranchissables, ces infrastructures sont devenues une menace importante pour la préservation de la biodiversité et des écosystèmes. Les impacts sont multiples et peuvent être directs ou indirects. Il s'agira donc de les analyser à travers la littérature.

Tout d'abord, les infrastructures de transport, principalement les routes et les voies ferrées, se placent comme un obstacle en participant directement à la mortalité par collision des espèces animales [Seiler A., 2005 ; Bernard P. et al., 2012]. Ce phénomène est croissant et a un impact néfaste sur la biodiversité, le bien-être des animaux, mais également sur le plan socio-économique et en termes de mortalité humaine [Seiler A., 2005 ; Morelle K. et al., 2013]. Cette

augmentation de collision d'animaux par les véhicules sur la route peut s'expliquer dans un premier temps par la densité du trafic et la vitesse de circulation. Pour cela, certains auteurs suggèrent des mesures de ralentissement du trafic (« *traffic calming* ») [Seiler A., 2005 ; Garcia-Gonzalez C. et al., 2012] ou encore une nouvelle répartition des flux de circulation [Garcia-Gonzalez C. et al., 2012]. Les caractéristiques de la route (pente, équipements, proximité des corridors écologiques, etc.) et celles du paysage (déplacements et activités des espèces, cloisonnement des espèces, etc.) jouent un rôle majeur sur le phénomène ainsi que sur sa répartition dans l'espace [Seiler A., 2005 ; Hummer J.E. et al., 2013]. Enfin, concernant les réseaux de transport d'électricité et les réseaux ferrés, il est possible de rajouter la mortalité par électrocution [Bernard P. et al., 2012]. À une échelle locale, la mise en place de clôtures et le déblaiement des bords de réseaux ferrés et routiers a montré des résultats positifs. Cependant, ces méthodes contribuent à la fragmentation et au cloisonnement des espèces qui diminue le brassage génétique des espèces [Seiler A., 2005].

Plus précisément, la fragmentation, c'est-à-dire la réduction des surfaces d'habitats couplée au cloisonnement des espaces, dégrade de plus en plus la qualité des habitats, impactant le bon fonctionnement des écosystèmes. Ce phénomène est défini comme étant une menace majeure pour la biodiversité par la convention de Rio (1992) et est considéré comme l'une des premières causes de la perte de la biodiversité par la communauté scientifique du Millenium Ecosystems Assessment (ONU). De nombreux auteurs [Forman R.T.T. et al., 2003 ; Rico A. et al., 2007] ont identifié les impacts de la fragmentation au sens strict à travers l'effet de barrière des infrastructures. Les clôtures, les glissières, les murs anti-bruits, les murets, la topographie de la route peuvent se placer comme des obstacles pour certaines espèces. D'autres études ont analysé l'effet lié à la route elle-même et celui lié au trafic routier [Jaeger J.A.G et al., 2005]. Le trafic routier, dépassé un certain seuil, peut avoir des propriétés répulsives. Ce concept multidimensionnel et multiscalaire sera développé plus loin (paragraphe 1.2.2).

En outre, les abords des infrastructures peuvent jouer le rôle d'habitat pour certaines espèces [Bennett A.F., 1991] notamment pour certains reptiles et mammifères [Bissonnette J.A. et Rosa S.A., 2009]. Ils se placent également dans certains cas comme des zones de charognage ou de chasse [Guinard E. et al., 2012]. Ces constats ne sont pas négligeables lorsque l'on sait que les abords routiers représentent environ 3400 km² en France. En ce qui concerne la flore et la faune d'arthropodes associée, cela peut même constituer des habitats de substitution des

habitats naturels disparus [Dupré R., 2009]. Pour finir, ces zones peuvent être identifiées comme des corridors¹ pour certaines espèces et favoriser ainsi la dispersion de celles-ci [Dupré R., 2009]. Cependant, l'ensemble de ces constats est à nuancer car la proximité d'un habitat à la route peut augmenter le risque de collision pour l'espèce concernée [Seiler A., 2005 ; Bernard P. et al., 2012]. De plus, certaines pollutions, qui croissent à proximité des routes [Ortega Y.K. et Capen D.E., 1999], peuvent avoir des effets néfastes voire mortels.

Par ailleurs, indirectement, les infrastructures de transport sont responsables de diverses pollutions comme c'est le cas des émissions de gaz d'échappement par les véhicules routiers. La qualité de l'air est nettement touchée par les gaz que dégagent les véhicules et porte atteinte à la préservation de la biodiversité, à la santé et au bien-être des espèces animales, végétales et des hommes, soit, de manière générale, à l'ensemble des écosystèmes [Chappelka A.H., 2001]. De plus, le bruit et la lumière que dégagent les véhicules modifient les comportements des espèces et impactent les écosystèmes [Bernard P. et al., 2012].

Enfin, différentes études se sont intéressées à la distance, variable selon l'espèce étudiée, jusqu'à laquelle l'infrastructure de transport peut avoir un impact. De plus en plus d'auteurs s'interrogent sur l'effet de seuil, qui supposerait le fait que l'infrastructure de transport n'a pas d'impact lorsque celui-ci n'est pas dépassé, ou d'un effet gradient [Eigenbrod F. et al., 2009].

Ainsi, les effets des infrastructures de transport sont nombreux et sont présents durant toutes les phases de mise en œuvre (chantier) et de mise en service de l'infrastructure. Par ailleurs, les répercussions peuvent se faire ressentir sur de nombreuses échelles. Spatialement, un impact local peut se placer comme un enjeu à l'échelle du paysage, du pays voire même du continent. De plus, le déclin d'une espèce peut avoir un effet sur la chaîne trophique et engendrer la modification comportementale d'une autre. En effet, une population « *proie* » qui disparaît impacte les « *prédateurs* » associés en les obligeant par exemple à migrer ou à chasser d'autres espèces et pouvant même entraîner leur mort. Aujourd'hui, il est admis que la fragmentation constitue le principal enjeu dans la sauvegarde et la protection de la biodiversité. Ce concept est

¹ Un corridor écologique renvoie à des éléments du paysage qui assurent les connexions entre des réservoirs de biodiversité et a pour but d'offrir aux espèces certaines conditions pour favoriser leur déplacement et assurer leur cycle de vie.

au cœur des avancées scientifiques et politiques avec notamment le Grenelle de l'environnement et la Trame Verte et Bleue qui le placent comme une priorité.

1.1.3 D'importants services écosystémiques impactés par la fragmentation

L'empreinte anthropique et plus particulièrement les infrastructures de transport ont de nombreux impacts sur la faune et la flore. Parallèlement, la biodiversité est support de notre développement et apporte de nombreux avantages au bien être de l'homme. Cela renvoie aux notions de services écologiques et écosystémiques qui définissent l'ensemble des services rendus par les écosystèmes et qui soutiennent la vie humaine. Il est possible de les classer en 4 catégories :

- les services d'**approvisionnement** (nourriture, bois, fibres,...)
- les services de **régulation** (macro et micro-climatique, régulation des inondations, des maladies,...)
- les services **culturels** (plaisirs récréatifs, esthétiques,...)
- les services de **soutien** (stabilité de la production d'oxygène atmosphérique et du climat global, formation et stabilité des sols,...).

Comme vu précédemment, le rapport du Millenium Assesment a été l'un des premiers documents réglementaires à soulever la notion de services écosystémiques, en mettant en avant la notion de coût et d'impact sur l'Homme. En parallèle, de nombreux rapports et études scientifiques ont tenté d'identifier ces services et de les quantifier.

Tout d'abord, l'approche économique de la biodiversité intéresse de plus en plus les politiques. Le rapport Chevassus-au-Louis (2009), par exemple, s'est intéressé à la valeur de ces services et a distingué deux éléments :

- la biodiversité « *remarquable* », correspondant à des entités (des gènes, des espèces, des habitats, des paysages) identifiées par la société comme ayant une valeur. Elle se fonde principalement sur d'autres valeurs qu'économiques ;

- la biodiversité « *ordinaire* », sans valeur intrinsèque identifiée comme telle mais qui, par l'abondance et les multiples interactions entre ses entités, contribue à des degrés divers du fonctionnement des écosystèmes et à la production des services qu'y trouvent nos sociétés.

C'est ainsi que certaines espèces, animales ou végétales bénéficient soit du statut « *espèce protégée* » soit d'une protection légale pour des raisons d'intérêt scientifique ou liées à des besoins de préservation du patrimoine biologique. La biodiversité « *ordinaire* » s'oppose donc à la biodiversité « *remarquable* » et elle est souvent qualifiée de diversité « *fonctionnelle* » car participant au fonctionnement de l'écosystème.

L'atteinte à la biodiversité et l'augmentation de la fragmentation des habitats peut détériorer l'attrait culturel d'un lieu et par conséquent représenter également une perte économique pour un ou plusieurs territoires. En effet, l'implantation d'une autoroute dans des zones à fortes potentialités naturelles présente des risques pour le maintien des habitats naturels et des activités touristiques [CEREMA, ex-Sétra, 2000]. Certains espaces peuvent également offrir un attrait esthétique particulier, être une source d'inspiration religieuse ou culturelle, et même stimuler et éduquer les générations futures (aspect pédagogique) [Gee K. & Burkhard B., 2010]. Dans le même ordre d'idée, la perte de la biodiversité peut impacter certaines activités récréatives comme la chasse ou la pêche [McInnes R.J., 2012 ; Cork S. & al., 2012].

En ce qui concerne la chasse et la pêche mais également à travers l'agriculture, des effets sur la production de nourriture et l'apport en eau peuvent se faire ressentir [Gordon L.J. & al., 2010 ; Bullock A. & Acreman M., 2003]. De plus, en termes d'agriculture, le maintien des ressources génétiques et de leur diversité mais aussi la génération et le renouvellement de la fertilité génétique contribuent à la variété des cultures [Cork S. & al., 2012 ; Ewel J.J. & al., 1991]. L'activité humaine peut favoriser le déclin de certains pollinisateurs comme les abeilles ou de certaines espèces végétales qui y sont liées [Balvanera P. & al., 2005]. Ce phénomène est parfois alarmant comme on peut l'observer dans des régions himalayennes où les populations d'abeilles ont disparu et où les villageois sont contraints de polliniser les pommiers à la main [<http://www.ledeveloppementdurable.fr>]. Par ailleurs, l'approvisionnement en matières premières, comme le bois ou encore les fibres qui peuvent être utilisés comme combustibles ou matériaux de construction, dépend également des écosystèmes et de leur bon fonctionnement [Sétra & al., 2011 ; Cork S. & al., 2012].

Enfin, les écosystèmes peuvent agir sur le climat et les intempéries. À l'échelle planétaire, ils participent à stabiliser et modérer le climat et le régulent à des échelles plus locales [Bolund P. & Hunhammer S., 1999]. Ce service dépend essentiellement de la végétation. Ils peuvent également modérer les inondations, les sécheresses, les températures extrêmes et les forces éoliennes [Mitsch W.J. & Gosselink J.G., 2000]. En effet, ces phénomènes catastrophiques sont amplifiés par l'Homme. Certaines inondations, par exemple, peuvent en partie s'expliquer par l'augmentation de l'imperméabilité des sols avec notamment l'extension des terrains drainés, la construction de nouveaux bâtiments ou encore de routes et de parkings au revêtement impénétrable. Pour finir, la végétation participe à la purification de l'air notamment à travers la photosynthèse ; et la flore ainsi que la faune peuvent présenter des caractéristiques favorables à la purification de l'eau.

Tableau 2 Exemples de services écosystémiques

Service	Fournisseur du service écosystémique	Unités fonctionnelles	Échelle spatiale
Esthétique et culturel	Toute la biodiversité	Populations, espèces, communautés, écosystèmes	Local / Global
Protection UV	Cycle biogéochimique, micro-organismes, plantes	Biogéochimique cycles, groupes fonctionnels	Global
Purification de l'air	Micro-organismes, plantes	Biogéochimique cycles, populations, espèces, groupes fonctionnels	Régional / Global
Atténuation des inondations	Végétation	Communautés, habitats	Local / Régional
Atténuation de la sécheresse	Végétation	Communautés, habitats	Local / Régional
Stabilisation du climat	Végétation	Communautés, habitats	Local / Global
Pollinisation	Insectes, oiseaux, mammifères	Populations, espèces, groupes fonctionnels	Local
Régulation des espèces exotiques	Parasitoïdes invertébrés, prédateurs invertébrés et vertébrés	Populations, espèces, groupes fonctionnels	Local
Purification de l'eau	Végétation, micro-organismes terrestre, micro-organismes aquatiques et invertébrés aquatiques	Populations, espèces, communautés, habitats	Local / Régional
Détoxification et décomposition des déchets	Couverture de feuilles et invertébrés terrestres, micro-organismes terrestres, micro-organismes aquatiques	Populations, espèces, communautés, habitats	Local / Régional
Formation et fertilisation des sols	Couverture de feuilles et invertébrés terrestres, micro-organismes terrestres, plantes qui fixent l'azote, plantes et animales pour les déchets	Populations, espèces, groupes fonctionnels	Local
Dispersion des graines	Fourmis, oiseaux et mammifères	Populations, espèces, groupes fonctionnels	Local

Ainsi, les écosystèmes rendent à l'Homme de nombreux services (Tableau 2) et il est parfois difficile de les identifier. Pour cela, une étude à différentes échelles est indispensable afin de comprendre les différents mécanismes et fonctionnements. L'inventaire et diagnostic de la biodiversité et des habitats présents permet également d'étayer l'ensemble des services écosystémiques potentiels.

Aujourd'hui, l'enjeu scientifique et politique majeur est de quantifier le coût des services impactés. Il est donc important d'analyser la manière dont coexistent les réseaux de transport et écologiques. C'est dans ce but que l'écologie du paysage tente de mettre en place de nombreuses méthodes afin d'analyser et de mesurer la fragmentation des habitats.

1.2 L'apport de l'écologie du paysage dans l'analyse de la fragmentation des habitats

Aujourd'hui, de nombreux phénomènes liés aux activités humaines sont admis comme étant néfastes pour la biodiversité. C'est donc afin de faire coexister les réseaux de transport et écologiques et à travers l'identification des services écosystémiques impactés que les politiques et les scientifiques tentent d'évoluer. Plus particulièrement, l'écologie du paysage se place comme une discipline au cœur de ces problématiques. Après avoir défini les notions de base de l'écologie du paysage, il s'agira de définir plus précisément la fragmentation et d'analyser, à travers la littérature, de quelle manière ce concept peut être mesuré.

1.2.1 Notions de base en écologie du paysage

L'écologie du paysage vise à étudier les interactions entre l'organisation spatiale d'un territoire et les processus écologiques. Selon Burel F. et Baudry J. (1999), le terme paysage renvoie à « *un niveau d'organisation des systèmes écologiques* » et donc à une échelle plus large que l'écosystème.

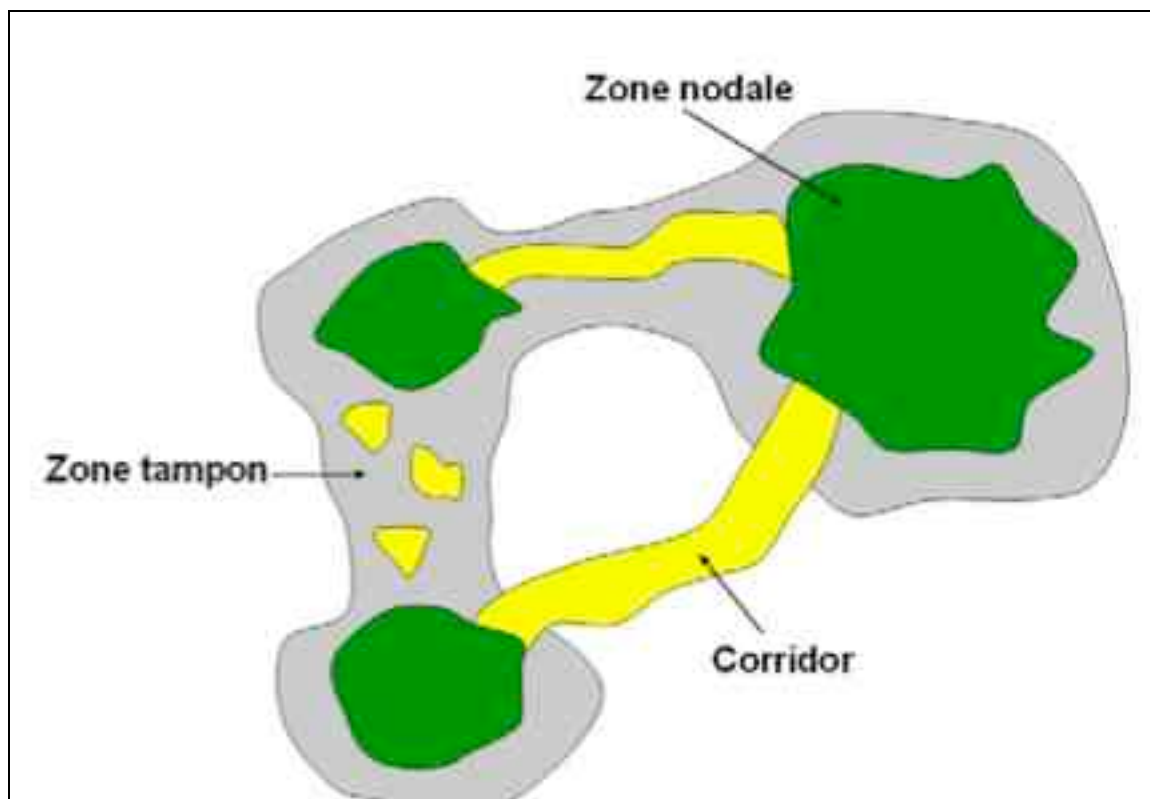
Le **réseau écologique** correspond donc à « *un assemblage cohérent d'éléments naturels et semi-naturels du paysage qu'il est nécessaire de conserver ou de gérer afin d'assurer un état*

La théorie des graphes pour analyser la transparence écologique des infrastructures de transport de conservation favorable des écosystèmes, des habitats, des espèces et des paysages ». Diverses interprétations de cette définition ont été mises en évidence (Figure 3 & Figure 4).

De la manière la plus simple, un réseau écologique se constitue de (Figure 3):

- **zones nodales** (ou tâches d'habitat) sont des espaces naturels de haute valeur du point de vue de la biodiversité où se trouvent des espèces ou écosystèmes particuliers. Elles assurent le rôle de **réservoir** pour la conservation des populations et la dispersion des espèces, constituant des espaces vitaux pour l'accomplissement de toutes les phases de développement d'une ou plusieurs populations ;
- **zones tampons** ont pour but de protéger les zones nodales des effets perturbateurs des zones périphériques
- **corridors écologiques** : éléments de liaisons fonctionnels entre les écosystèmes ou entre les habitats des espèces permettant les déplacements des populations. Ils ont de nombreuses fonctions et assurent la liaison entre les tâches d'habitat. Le corridor biologique est spécifique à une espèce ; le corridor écologique est une structure spatiale multifonctionnelle et peut rassembler plusieurs corridors biologiques ; le réseau écologique définit l'ensemble fonctionnel des corridors ;

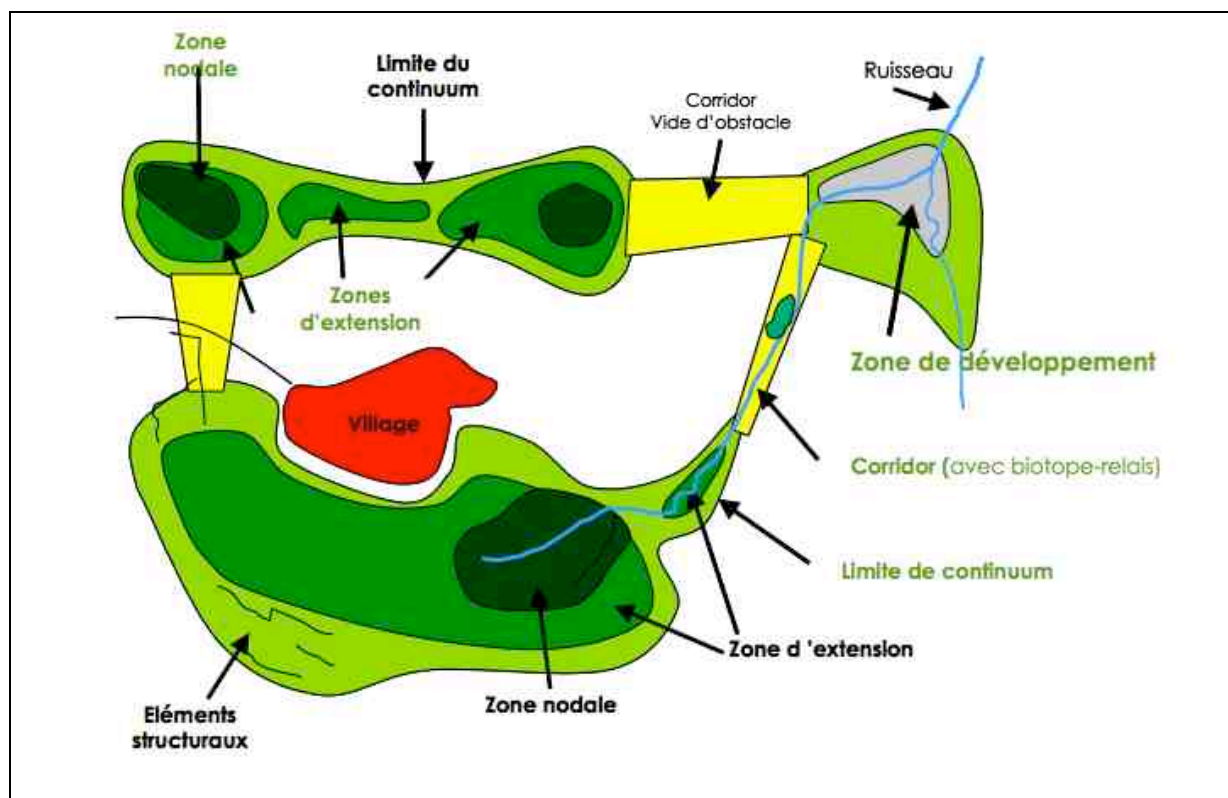
Figure 3 Réseau écologique défini dans le cadre de la Stratégie paneuropéenne pour la diversité biologique et paysagère, d'après CEREMA, EX-CETE, GERBEAUD MAULIN F. & LONG M. (2008)



À cela, certains auteurs y rajoutent :

- les **zones de restauration** qui visent à améliorer les potentialités de conservation des zones nodales et à favoriser les liaisons entre les espaces vitaux ;
- le **noyau** qui est un site d'intérêt écologique national ou supranational ;
- la **continuité écologique** définit la libre circulation des espèces biologiques ;
- les **zones d'extension** sont associées aux zones nodales et constituent des secteurs intermédiaires entre le cœur de la zone nodale et le reste du territoire. Ce sont les zones à privilégier si l'on souhaite développer les zones nodales en termes de restauration ou de renforcement de la qualité.

Figure 4 Réseau écologique défini par le bureau d'études ECONAT (source : Econat & Conseil général de l'Isère, 2001)



Les corridors sont donc vitaux pour assurer les déplacements des espèces, leur développement et leurs échanges, en un mot leur survie. Ils remplissent ainsi différentes fonctions :

- les **déplacements**, soit entre des zones ayant des fonctions différentes (zone pour se nourrir et aire de repos par exemple) soit d'un habitat à un autre (migration quotidienne, saisonnière, etc.)
- la **dispersion**

- l'**habitat**, lorsque toutes les fonctions de survie sont assurées par celui-ci
- **filtre** (corridor favorable pour une espèce peut être défavorable pour une autre)
- **source**, parfois assimilée à un réservoir d'individus
- **puits**

Les corridors se présentent sous de nombreuses formes, le plus souvent linéaires (haies, chemins, etc.) mais également en « *pas japonais* » (succession d'îlots, mares permanentes, bosquets, etc.) voire à travers des espaces de la matrice libres d'obstacles. Par ailleurs, ils répondent à certaines caractéristiques relatives à des conditions favorables aux espèces :

- corridor **thermo-hygrométrique**, où le milieu est rendu favorable avec le contrôle de la température et de l'humidité (tranchée, lisières, etc.)
- corridor de « **noir** », c'est-à-dire sans pollution lumineuse
- corridor d'**air propre**, qui vise à optimiser la qualité de l'air
- corridor de **calme**, c'est-à-dire avec une pollution sonore limitée.

L'ensemble des éléments qui constituent une continuité fonctionnelle pour une ou plusieurs espèces désigne un **continuum**. On peut distinguer quelques grandes familles : continuum forestier, agricole extensif, prairial, paludéen (zones humides), hygrophile ou aquatique, littoral. Notons également que certains éléments peuvent appartenir à plusieurs continums.

Enfin, il semble nécessaire de favoriser les continuités écologiques et les déplacements des espèces. Le concept de **connectivité écologique** est donc au cœur de l'écologie du paysage. Il permet de définir l'interaction d'une espèce à la structure paysagère soit « *la capacité d'un paysage à assurer la satisfaction des besoins de déplacements des espèces entre les différents éléments qui le composent* ».

Ainsi, aujourd'hui, il est admis que les infrastructures de transport ont de nombreux impacts sur ces réseaux :

- directs (consommation d'espaces, etc.)
- indirects (modification du comportement des espèce, etc.)

- induits (mesures connexes d'un projet comme l'aménagement foncier, reboisement, etc.)
- temporaires (fouilles archéologiques, base chantier, etc.)
- cumulés (nouvelles infrastructures de transport, etc.).

Il est donc primordial de faire coexister les réseaux écologiques et le réseau routier afin de limiter au maximum la fragmentation des habitats et de reconstituer un réseau d'échanges pour les espèces animales et végétales.

1.2.2 La fragmentation : un enjeu majeur

Partie intégrante des paysages, les infrastructures de transport agissent sur l'ensemble des écosystèmes avec de nombreux effets sur la biodiversité et leur environnement et ce sur plusieurs échelles. Les réseaux de transports se placent comme l'une des principales causes de fragmentation pour de nombreuses espèces [Garcia-Gonzalez C. & al., 2012] avec d'importantes conséquences sur la biodiversité, que l'on peut caractériser (ou classer) selon 4 échelles :

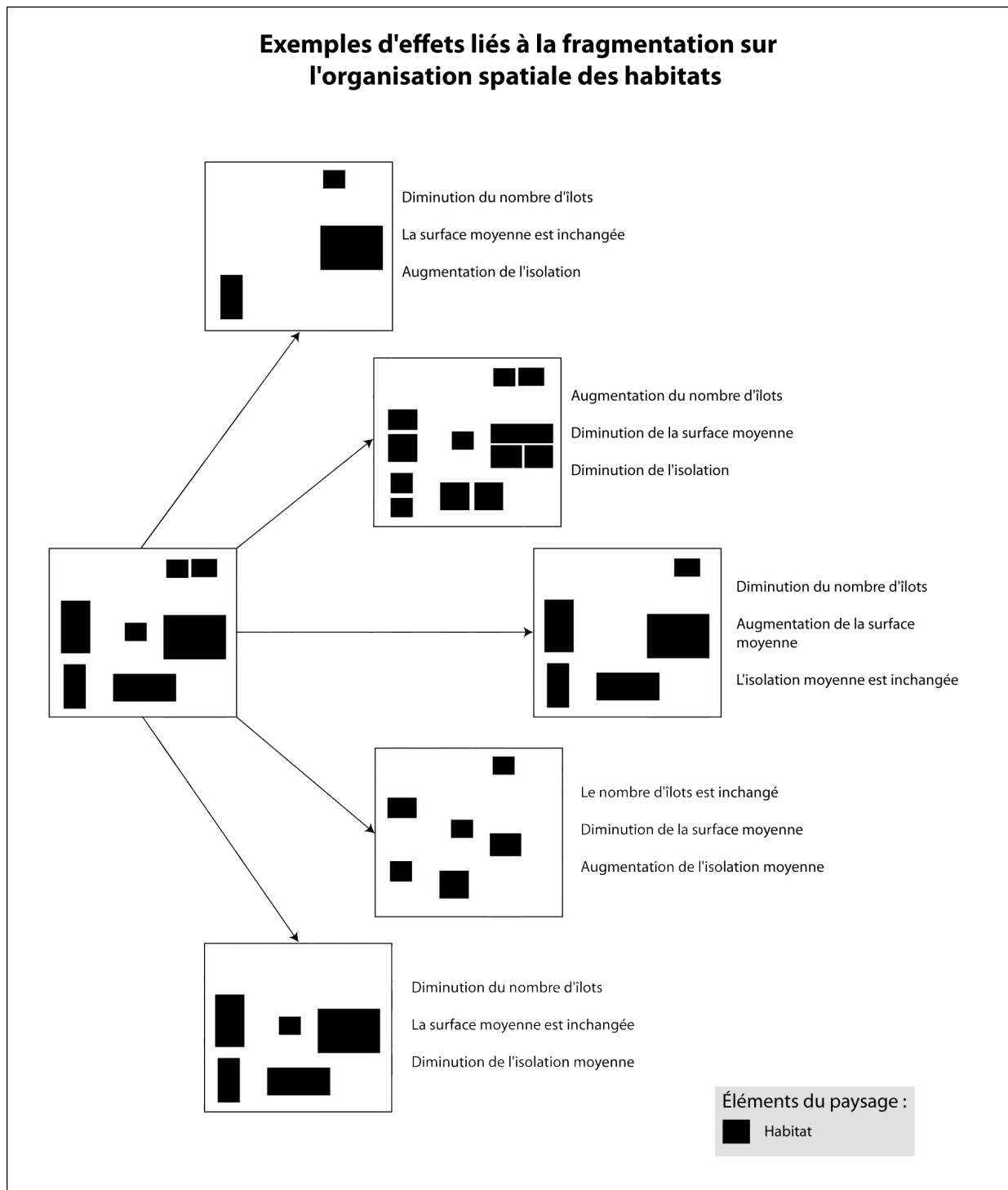
- diversité génétique
- diversité des espèces
- diversité de la communauté
- diversité du paysage

L'écologie du paysage définit la **fragmentation** des milieux naturels comme « *tout phénomène artificiel de morcellement de l'espace susceptible d'empêcher une ou plusieurs espèces vivantes de se déplacer ou de se disperser* ». Donc, plus la fragmentation est importante, plus la connectivité diminue. Elle a principalement trois grands effets (Figure 5) et implique la modification des habitats à travers [Betts M., 2000] :

- leur **taille**, déterminante pour la survie des espèces ;
- leur **structure**, les formes compactes favorisent la conservation de la ressource, les formes tortueuses augmentent les interactions avec l'environnement, les formes allongées servent de corridor pour les espèces ;
- l'**isolement**: la distance entre les unités (connectivité) est déterminante, plus la distance entre les unités est courte, plus les corridors réduisent l'isolement ;

La fragmentation ne peut pas se résumer à un seul de ces phénomènes mais à tous ces phénomènes simultanément. En effet, ils peuvent avoir, dans certains cas, des effets similaires sur la biodiversité et dans d'autres cas amener à des conclusions totalement différentes. Ceci peut notamment s'observer sur l'organisation spatiale du paysage dont les effets possibles de la fragmentation sont nombreux (Figure 5).

Figure 5 Exemples d'impacts de la fragmentation sur les habitats, d'après Fahrig L. (2003)



Par ailleurs, les impacts sur les fonctions écologiques et les populations impliquent :

- le remplacement des éléments éco-paysagers
- la modification de l'espace et donc l'altération des connectivités écologiques
- l'isolement écologique des milieux naturels au sein d'une matrice moins favorable
- la diminution du taux de dispersion qui accroît le risque d'extinction
- la modification de l'effet-bordure

Enfin, les espèces ne sont pas affectées de la même manière par la fragmentation de leurs habitats, ce qui sous-entend l'importance de la connaissance de leurs caractéristiques :

- leurs capacités adaptatives
- leur degré de spécialisation
- leur dépendance à certaines structures écopaysagères
- leur capacité à voler ou à franchir des obstacles (parois, falaises, grillades, routes, etc.)
- la biologie de leurs populations
- etc.

Dans tous les cas, toutes les espèces, même volantes, sont touchées par la fragmentation. Il s'agit donc de définir les enjeux et les degrés de l'impact de la fragmentation sur chacune des espèces.

Ainsi la fragmentation peut être analysée à travers la taille, la structure et l'isolement de l'habitat. L'enjeu politique et scientifique réside dans la mesure de la fragmentation et de ces effets afin de pouvoir comprendre les différents mécanismes et agir pour limiter les effets néfastes.. Différentes approches sont possibles mais il semble qu'il y ait encore des lacunes à surmonter.

1.2.3 Certaines lacunes pour mesurer la fragmentation

La fragmentation des paysages et des habitats est un concept incontournable en écologie du paysage. De plus, son importance est soulignée par les besoins de nos sociétés actuelles et futures en matière de préservation de l'environnement et de protection de la planète. Mesurer, quantifier et modéliser ce phénomène est primordial afin de comprendre comment réduire ces effets néfastes [Fahrig L., 2003

Différentes approches ont été ainsi proposées, on en distinguera deux types [Foltete J.-C., 2012] :

- l'approche par l'habitat qui se centre sur la modification des structures paysagères due aux infrastructures de transports
- l'approche par l'espèce qui tend à analyser et mesurer le changement spatial dans la distribution de certaines espèces.

Dans le premier cas, de nombreuses études ont tenté de mettre en place des indicateurs de fragmentation applicable à l'ensemble des paysages [Baranyi G. et al., 2011 ; Fahrig L., 2003]. Rappelons donc que la fragmentation de l'habitat implique trois grands effets : la réduction de la taille de l'habitat, l'augmentation du nombre d'îlots et l'augmentation de l'isolement des habitats [Fahrig L., 2003 ; Sétra et al., 2011] (Figure 5). Ils se placent tous comme une base d'indicateurs de la mesure de la fragmentation de l'habitat [Fahrig L., 2003].

Dans certains cas, la fragmentation est assimilée à une perte ou à une réduction de l'habitat sans prendre en compte l'ensemble des autres effets [Carlson A. & Hartman G., 2001] et notamment les changements liés à la configuration de l'habitat. Il est pourtant indispensable d'analyser l'augmentation du nombre d'îlots, la diminution de leur taille et l'augmentation de leur isolement. De plus, certains auteurs dissocient la fragmentation du morcellement et de la réduction de la taille des habitats [Collingham Y.C. & Huntly B., 2000] tandis que d'autres utilisent la taille de l'habitat comme mesure de la fragmentation [Golden & Crist, 2000]. Mesurer la fragmentation à travers la taille de l'îlot est une mesure ambiguë. En effet, il est possible que la fragmentation des habitats ait un impact sur la configuration spatiale mais pas sur la surface [Fahrig L., 2003] (Figure 5). La quantité d'habitats à l'échelle du paysage est, dans la plupart des études, analysée à travers une mesure de la configuration de l'habitat. De nombreux auteurs utilisent la distance aux plus proches voisins (« *nearest-neighbor-distance* ») [Fahrig L., 2003 ; Haig et al., 2000]. Cette mesure peut être couplée à la surface des habitats voisins et à leur nombre. Dans tous les cas ces méthodes permettent d'analyser l'isolation des îlots par rapport aux autres.

En réalité, la fragmentation ne se résume pas à un seul de ces phénomènes mais à tous ces phénomènes simultanément. En effet, ils peuvent avoir, dans certains cas, des effets similaires sur la biodiversité et dans d'autres cas amener à des conclusions totalement différentes. Ceci peut notamment s'observer sur l'organisation spatiale du paysage dont les effets possibles de la

fragmentation sont nombreux. Il semble donc difficile de mesurer la fragmentation en soi. Certains appliquent des analyses multivariées, le plus souvent avec une ACP (Analyse en Composante Principale), prenant en compte de nombreux éléments du paysage, et où chaque axe de l'ACP représente une composante différente du paysage [Fahrig L., 2003]. Cependant, aucune de ces méthodes ne tient compte de la biodiversité et de l'espace en tant qu'élément fonctionnel. De plus, un paysage peut apparaître très fragmenté et être très néfaste pour une espèce et n'avoir aucun effet sur d'autres.

Aujourd'hui, l'analyse de la fragmentation se fait de plus en plus à travers la notion de connectivité paysagère soit l'interaction entre une espèce et la structure paysagère dans laquelle elle évolue [Taylor et al., 2006]. Plus exactement, cela correspond au niveau de connexion potentiel entre les différentes tâches d'habitat (rapport entre la capacité de mouvement de l'espèce et le degré d'espacement des tâches). Ce type d'étude vise à identifier les réservoirs biologiques ainsi que les zones de connexions entre deux réservoirs, et les corridors écologiques potentiels, à travers différentes échelles et en tenant compte des exigences biologiques des espèces [Sétra et al., 2012]. Afin d'analyser et de rétablir les connexions, l'usage des graphes paysagers est de plus en plus fréquent [Minor E.S. & Urban D.L., 2007 ; Minor E.S. & Lookingbill T.R., 2010]. Au delà d'une simple analyse paysage, cela permet d'analyser les interactions entre une ou plusieurs espèces et l'espace dans lequel elle vit. Cette méthode est donc sensible à l'échelle d'analyse et ne peut pas être appliquée de la même manière sur différents territoires car chacun possède ses spécificités.

Ainsi, de nombreuses données (images satellites, cartes, photographies aériennes, etc.) permettent des analyses diachroniques en quantifiant l'ensemble des phénomènes d'artificialisation. Cependant, l'analyse de la fragmentation et de ses effets sur les écosystèmes doit se baser sur les caractéristiques des écosystèmes présents et appréhender le paysage dans sa dimension fonctionnelle en ne se limitant pas seulement au paysage. Actuellement, la théorie des graphes semble l'une des méthodes les plus adaptées car prenant en considération les caractéristiques des espèces. Par ailleurs, il est important de noter que la fragmentation paysagère et de l'habitat est un phénomène multiscalaire [Fahrig L., 2003]. Un phénomène mesuré à l'échelle de l'îlot peut avoir un effet à l'échelle du paysage, voire à une échelle encore plus large. Enfin, notons que certains facteurs de fragmentation sont plus difficilement mesurables. C'est le cas notamment de certaines barrières écologiques non-physiques comme la pollution [Fahrig L., 2003]. A partir de ces constats, le programme ITTECOP (Infrastructures de Transports Terrestres, Écosystèmes et Paysages) s'est fixé l'objectif d'analyser la

transparence écologique des infrastructures de transports entre Salon-de-Provence et Arles. Ce terrain d'étude présente de nombreux enjeux qu'il s'agira de présenter.

1.3 Le programme ITTECOP : les jumelages de la RN 113 et projet de contournement autoroutier d'Arles

Les activités humaines sont reconnues comme étant le premier facteur d'évolution des paysages [Burel F. & Baudry J., 1999]. Plus particulièrement, les infrastructures de transport sont majoritairement responsables de la fragmentation du paysage et des habitats, phénomène qui participe à la perte de biodiversité. Il paraît donc prioritaire d'analyser la transparence écologique des infrastructures de transports avec pour objectif de pouvoir reconstituer les corridors écologiques, de restaurer ou de maintenir le bon fonctionnement des écosystèmes, de préserver la biodiversité et par voie de conséquence le bien-être de l'homme. De par leurs enjeux, le projet de contournement autoroutier d'Arles (A 54) ainsi que le jumelage de la RN 113 avec l'A 54 et celui de la RN 113 avec la voie ferrée ont été ciblés dans le programme ITTECOP.

1.3.1 Le concept de jumelage

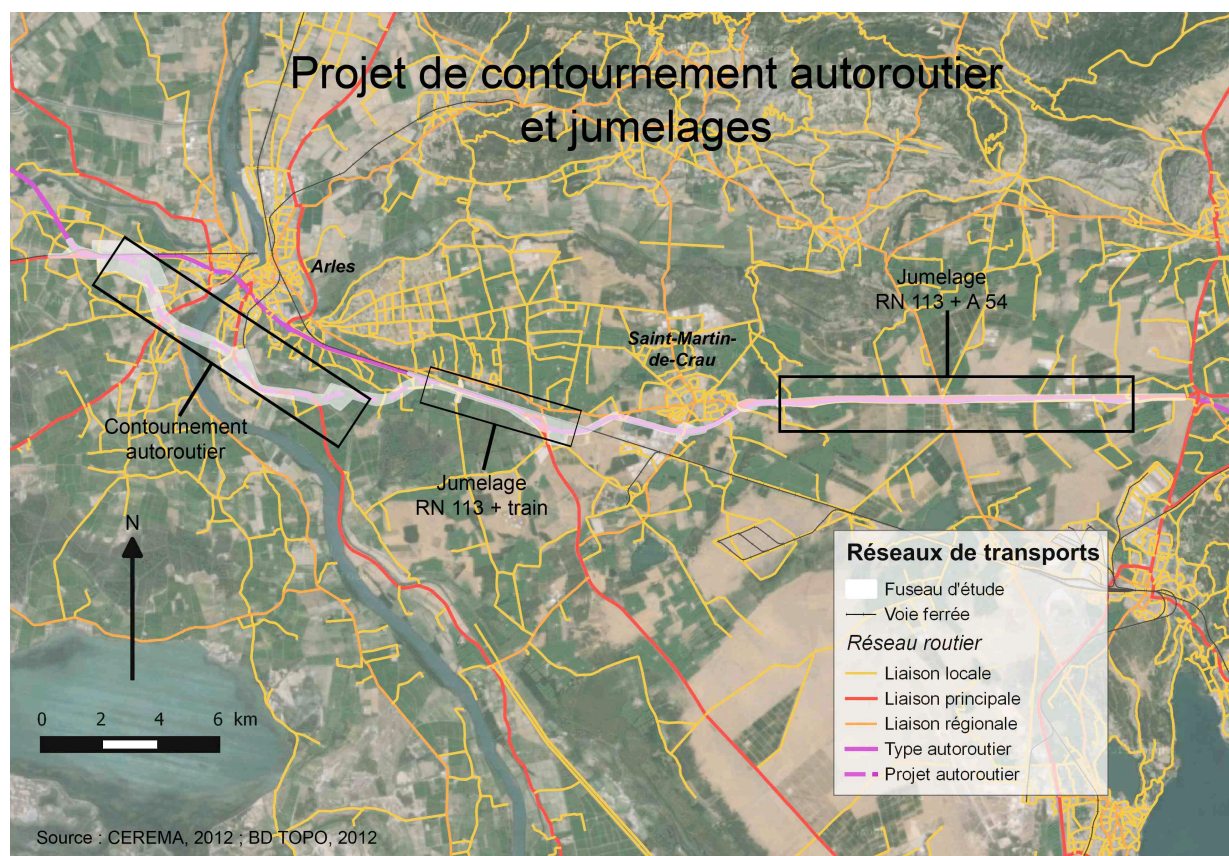
L'implantation d'une nouvelle infrastructure routière suscite toujours de l'intérêt avec de nombreux enjeux. Dans notre cas, à l'échelle nationale, le principal enjeu du contournement d'Arles était de relier l'A9 à l'A7 et ainsi d'offrir une continuité autoroutière entre l'Italie et l'Espagne. Cependant, avec le Grenelle de l'Environnement, les indicateurs environnementaux ne sont plus masqués derrière les indicateurs économiques et les enjeux demeurent alors.

Le projet de l'A54 n'est pas récent et les premières portions datent de plus de 40 ans :

- la première portion a vu le jour dans les années 70 au Sud de Salon-de-Provence sous forme d'une voie rapide (section Pélassanne-Grans)
- dans les années 90 le tronçon autoroutier Arles-Nîmes est inauguré

- en 1996, la portion entre Salon-de-Provence et Saint-Martin de Crau (section Saint-Martin-de-Crau – Grans) est mise en service
- le projet de contournement d'Arles qui verra le jour dans quelques années

Carte 1 Situation du projet de contournement autoroutier et des jumelages



Par ailleurs, la mise en œuvre de cette infrastructure a été réalisée, en partie, de manière à impacter a minima l'environnement et de consommer le moins d'espace possible. C'est pour cela que deux jumelages ont été créés (Carte 1) :

- celui de la RN 113 avec l'A 54 (Photo 1) avait pour but :

- d'éviter les zones de protections spéciales liées aux milieux naturels
- limiter l'impact sur les zones agricoles
- permettre le maintien du canal de Laglande pour l'arrosage

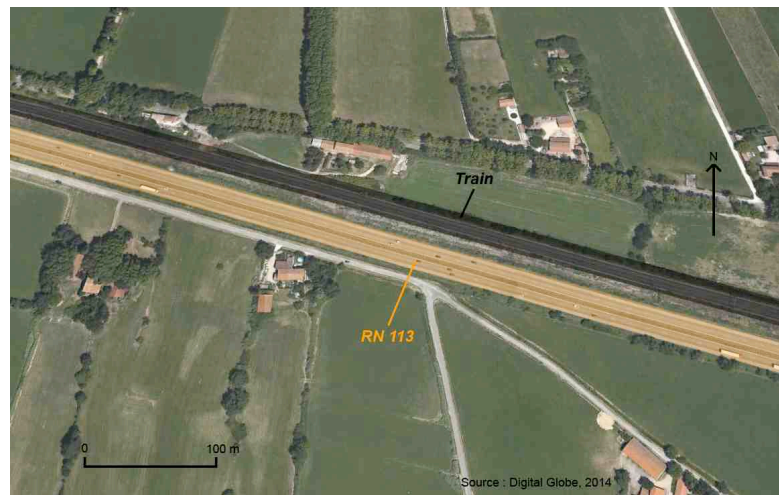
Photo 1 Image aérienne du jumelage de l'A54 et de la RN113



- préserver les haies brise vents

- la RN 113 (prolongement de l'A 54) avec le réseau ferré (Photo 2) se place également sur le fuseau d'étude et se situe entre Saint-Martin-de-Crau et Salon-de-Provence. Concernant ce jumelage, on peut également mettre en avant les lignes hautes tensions qui sont le plus souvent jumelées pour des raisons foncières et d'impacts environnementaux.

Photo 2 Image aérienne du jumelage de la RN113 et de la voie ferrée



Le jumelage consiste à concevoir une nouvelle infrastructure de transport à proximité d'une déjà existante. Cependant, ce n'est pas une simple juxtaposition. En effet, le principal intérêt du jumelage réside dans les bénéfices globaux et locaux. Les impacts de deux infrastructures jumelées devraient être moins importants que le cumul de deux construites séparément. En France, ce concept est relativement récent avec le premier cas qui concerne la LGV Atlantique. De ce fait, il existe peu d'éléments concernant les avantages et les inconvénients de ce type

d'aménagement. C'est donc à travers ce constat que le programme de recherche ITTECOP a été financé par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. L'objectif est d'évaluer les évolutions des paysages et de la biodiversité ainsi que l'impact des infrastructures jumelées. Aujourd'hui, beaucoup considèrent que le jumelage d'infrastructures de transports est la meilleure solution pour limiter l'emprise et les impacts environnementaux. Cela pourrait également permettre de limiter les effets de la fragmentation liés à la mise en place d'une nouvelle infrastructure. De ce fait, l'un des objectifs de ce mémoire est de tenter de définir au delà de quel seuil de distance peut-on considérer que les infrastructures de transports sont jumelées.

Par ailleurs, depuis maintenant quelques années, le prolongement de l'A54 est un projet essentiel pour assurer la continuité entre l'Espagne et l'Italie. Cependant, de nombreux enjeux locaux, régionaux et environnementaux existent impliquant le contournement de la ville d'Arles. Le projet est constitué d'un tracé neuf évitant le centre urbain arlésien et qui s'étend sur environ 15km (Carte 1). D'après les décideurs, cela permet principalement de² :

- réduire par 4 le nombre de véhicules sur la RN 113 et ainsi limiter le nombre de camions notamment ceux transportant des matières dangereuses
- réduire les nuisances sonores pour les riverains
- réduire la pollution de l'air en centre ville
- requalifier, au sein de la ville d'Arles, la RN 113 en boulevard urbain
- construire un port de plaisance et requalifier les quartiers sud avec notamment le quartier de la Barriol
- mettre en valeur le cirque romain
- sur une échelle plus large, limiter la congestion des axes routiers qui constituent une menace pour le développement du Grand port Maritime de Marseille

² Source ; Grille d'évaluation élaborée par la SNIT, document de travail du 16/09/2010 (<http://www.camargueenvironnement.com/media/Grille-du-contournement-autoroutier-elaboree-par-la-SNIT.pdf>)

Ainsi, le contournement autoroutier pourrait avoir de nombreux impacts sur la biodiversité, les paysages et, de manière plus large, l'environnement et tout ce que cela implique avec notamment l'ensemble des services écosystémiques. Il se placerait comme une nouvelle barrière pour le déplacement des espèces animales et végétales. Le respect d'une certaine transparence écologique pour cette infrastructure est donc un enjeu majeur. De plus, le fuseau d'étude touche de nombreux territoires et paysages, riches et diversifiés, présentant chacun leurs spécificités. Il s'agira donc de les décrire et de les analyser à travers une approche diachronique afin d'observer les changements paysagers impliqués par l'accroissement de l'empreinte humaine.

1.3.2 Différents territoires concernés

Le tracé autoroutier s'étale sur environ 52 km (en distance euclidienne et un peu plus de 60 km en distance routière) entre Salon-de-Provence et Arles (Carte 1). De nombreux espaces sont concernés par ce projet. Ils présentent chacun des caractéristiques différentes. Cette diversité s'observe de manière plus ou moins importante à tout les points de vue, socio-économique, environnemental ou encore paysager.

Tout d'abord, cette zone concerne trois communes :

- **Arles** est la plus vaste commune de France et se marque en particulier par :

- sa **situation géographique** : elle est construite sur un rocher entre la Camargue, la Crau et les Alpilles (DIREN, 2012) ;
- son territoire majoritairement composé de terres classés en **Zone Natura 2000** (80%) ou en **Parc Naturel** ;
- malgré son vaste territoire, Arles ne compte qu'un peu plus de 53 000 habitants (Insee, 2010) ;
- le **Rhône** : richesse d'une part et risque d'autre part car Arles est vulnérable aux inondations qui correspondent souvent aux crues du fleuve et du canal du Vigueirat, survenant entre Octobre et Avril avec les fortes pluies et la fonte des neiges. Les bases de données fournies par la DREAL PACA permettent

d'observer que 86% du territoire est situé en zone inondable et protégé par des digues ;

- l'important **réseau hydrographique** constitué de nombreux canaux et roudines pour le développement de l'activité agricole ;
 - la **voie rapide** entre Saint-Martin-de-Crau et Arles qui enregistre une importante densité de circulation (60 000 véhicules par jour en moyenne), ce qui crée une frontière dans la ville et d'importantes nuisances pour les riverains ;
 - de fortes **difficultés socio-économiques** de la population arlésienne avec un fort taux de chômage : 14,3% des actifs sont à la recherche d'emploi contre 9,6% pour la moyenne nationale (INSEE, 2010).
- **Saint-Martin-de-Crau** est une commune créée en 1925 qui s'étend sur 214,87 km² (6^e commune la plus étendue de France) et se situe entre Arles et Salon-de-Provence. Elle se marque notamment par :
- son **industrie**, avec de récentes constructions et expansion des zones industrielles qui a permis la baisse du chômage : 13,7% en 2000 contre 10,1% en 2010 (INSEE, 2010) ;
 - bien que moins important que celui d'Arles, le **réseau hydrographique** de la commune a permis le développement de l'activité agricole ;
 - l'importance du **réseau routier** avec l'A54 en direction de Salon-de-Provence, la RN113 vers Arles et la RN568 vers Fos-sur-Mer.
- **Salon-de-Provence** s'étend sur 70,3km² sur la plaine de la Crau. Elle se caractérise par :
- ses **espaces naturels** et **semi-naturels** qui occupent 70% du territoire et qui dominent les espaces agricoles (Corine Land Cover, 2006) ;
 - sa **position centrale** qui lui permet un accès à l'ensemble des pôles urbains et d'activités. Un calcul des distances routières permet de dire qu'Aix-en-Provence se situe à environ 30km, Avignon et Arles à une quarantaine et Marseille à seulement 50km ;

- l'importance du **réseau routier** avec le croisement des autoroutes A7, A54 ainsi que de nombreuses importantes routes nationales dont la RN113.

Par ailleurs, le projet autoroutier traverse différents paysages. On distingue deux grandes unités paysagères :

- la **Crau** :

- 2 grands ensembles : la « **vieille Crau** » ou **Crau d'Arles** qui se caractérise par les dépôts Villafranchiens (cailloutis subalpins superposés à des marnes fluvio-lacustres) ; la **jeune Crau** correspond à la Crau du Luquier à cailloutis calcaires et silicieux ainsi qu'à la Crau de Miramas et Salon-de-Provence à galets silicieux dominants
- Les communes de Saint-Martin-de-Crau et de Salon-de-Provence se situent sur cette entité qui s'étend sur plus de 70 000 Ha ;
- La Crau est dominée par les **pelouses, pâturages et prairies** destinés à l'élevage animal et au fourrage. Notons que l'élevage ovin est une activité importante sur la Crau avec un système de transhumance vers les Alpes. La race ovine locale est le Mérinos d'Arles, élevée pour la laine et les agneaux ;
- La partie Nord est dite humide. Elle fut irriguée à partir du XVI^e siècle par le canal de Craponne et mis en culture. L'eau s'infiltre et alimente la nappe phréatique avec la Durance qui contribue à entretenir cette partie de la Crau (70%) complété par la pluie (30%) ;
- La partie Sud de la Crau est la dernière steppe de l'Europe de l'Ouest et se forme d'une infinité de pierres de formes et de tailles semblables à des galets. La Crau est classée en Réserve Naturelle « *des Coussouls* ».
- Les parcelles déclarées sur le territoire de la Crau se compose essentiellement de **landes** (40%) et de **prairies permanentes** (34%). Les parcelles agricoles sont donc principalement destinées à l'élevage d'animaux. [RPG, 2010] ;

- la Crau est quasiment plane avec une altitude minimale de 5m dans le Sud et une altitude maximale de 50m dans le Nord ;
- la **Camargue** :
 - on distingue 3 ensembles bien spécifiques : l'**étang du Vaccarès** au Nord (haute Camargue) souvent consacré à l'agriculture et doté d'une végétation composé d'arbres hauts ; au centre, la **moyenne Camargue**, fluvio-lacustre, composée de terres plus basses, plus salées et réparties autour de l'étang de Vaccarès ; au Sud, la **basse Camargue**, zone d'étangs salés et de sansouires qui se termine par le littoral méditerranéen.
 - elle concerne notamment la commune d'**Arles** et s'étend sur plus de 145 000 Ha.
 - La Camargue se compose essentiellement de **zones humides** qui représentent plus de 31% de son territoire (CLC, 2006). Elles sont surtout présentes au Sud avec les nombreux marais et plan d'eau salée. Le Nord du territoire, plus propice aux terres agricoles, est principalement constitué de rizières, emblématique de la Camargue. Les **landes** destinées à l'estivage sont également bien représentées (RPG, 2010) ;
 - l'**eau** est omniprésente avec un cycle correspondant au climat méditerranéen : inondation automnale jusqu'à mai-juin puis évacuation progressive vers l'étang du Vaccarès, au centre du delta, et une évaporation conduisant à un assèchement estival. L'action de l'homme a tendance à s'opposer à ce cycle notamment pour se prémunir des crues (installation de digues) et pour assurer les besoins agricoles (aménagement de bassins de drainage, irrigation privée et collective). Le **réseau hydrographique** et les infrastructures qui y sont liées marquent le territoire ;
 - la Camargue s'étend à basse altitude (moins de 3m) et est relativement plane ;
 - une majeure partie du territoire est situé en zone Natura 2000. On relève des habitats remarquables ainsi qu'une importante biodiversité, notamment avec une avifaune remarquable ;

La Crau et la Camargue sont des territoires très agricoles qui représentent à eux deux environ deux tiers des parcelles agricoles déclarées des Bouches-du-Rhône (RPG, 2012). La Camargue, dominée par ses zones humides, est propice à la culture du riz. La Crau, quant à elle, présente de vastes parcelles le plus souvent destinées au fourrage et à l'élevage animal.

Ainsi, l'agriculture domine les territoires concernés. La présence anthropique se fait ressentir sur l'ensemble du fuseau d'étude, que ce soit à travers les différentes communes traversées mais également de par l'importance de l'agriculture qui s'est organisée autour d'un important et complexe réseau de canaux et de roubines. Le réseau routier joue également un rôle majeur. Ces constats pourraient donc laisser penser à une certaine évolution des paysages.

1.3.3 Une évolution des paysages de la Camargue et de la Crau peu considérable depuis le 19^e siècle

Les territoires concernés par l'aire d'étude présentent des parcelles principalement agricoles et un important réseau hydrographique permettant de les alimenter. De plus, les infrastructures agricoles et de transports marquent les paysages. De nombreuses évolutions peuvent être survenues, notamment sur l'utilisation des parcelles agricoles, ce qui pourrait avoir des conséquences sur certaines espèces animales et végétales.

La Camargue est une plaine alluviale formée par le delta du Rhône. L'écosystème qu'elle forme est en partie le résultat de la remontée des eaux salées de la Méditerranée sur le lit du fleuve [Agulhon L. et al., 2001]. Autour d'Arles, avant le 19^e siècle, les cultures céréalières dominent les paysages. Les pâturages, destinés à l'élevage des moutons, des chevaux et des taureaux, sont également très représentés (1/3 du territoire). L'hostilité et la rudesse du climat ont été des facteurs déterminants dans la dispersion de l'habitat : les exploitations et les mas se sont développés, à proximité du Rhône dans les zones les plus favorables aux cultures [Agulhon L. et al., 2001]. Le centre de la Camargue était encore presque totalement recouvert de marais. Au milieu du 19^e siècle, l'exploitation agricole présente un aspect de plus en plus industrialisé : le réseau de canaux se développe pompant l'eau du Rhône ainsi que le réseau d'assainissement. La crise agricole du deuxième empire avec la concurrence des produits étrangers, fait s'effondrer les prix du blé et de l'avoine. À cela se rajoute la crise du phylloxera, un insecte qui s'attaque au vignoble. Une découverte pour éradiquer cette espèce exotique permet l'implantation de la vigne en Camargue qui connut son apogée en 1933 et recula après

l'importation de porte-greffes américains. La 2nd guerre mondiale privant le pays de ses ressources coloniales de ravitaillement, de nombreux investisseurs marseillais effectuèrent des achats massifs dans la Crau et la Camargue, régions de grandes propriétés. La guerre finie, les parcelles ont été mises en valeur avec la riziculture qui se développa grâce aux aides du plan Marshall. Ceci favorisa le déclin de la vigne. Dans les années 60, la concurrence du prix du riz italien va une fois de plus modifier les pratiques agricoles en Camargue, remplaçant le riz par les céréales et les fourrages [Blot E. & al., 1992]. En 1981, un plan de relance permet au riz de se maintenir avec une certification de qualité et un label d'indication géographique protégée [Blot E. & al., 1992]. La Camargue a donc subi de nombreuses mutations concernant le type de culture mais est restée caractérisée par sa grande couverture agricole.

La Crau est née de l'ancienne confluence de la Durance et du Rhône. Ses limites géographiques sont définies par ses limites géologiques « *qui séparent les alluvions des plateaux (formation caractéristique de la Crau), des alluvions modernes de l'Ouest et du Nord et des molasses d'origine marine du Sud-Est et de l'Est* » [Rainaud A., 1893]. Avant la construction du canal de Craponne en 1554, la Crau n'était qu'un vaste désert de galets et de graviers. Les grandes périodes de sécheresse ne permettaient pas de développer les cultures. Le canal va amener l'eau de la Durance et transformer ce territoire, plus particulièrement la Crau d'Arles. Avant le 19^e siècle, la Crau d'Arles se caractérise surtout par la culture du blé, de la vigne et de l'olivier : on ne cherchait pas à améliorer les conditions naturelles, on s'y adaptait. A partir du 19^e siècle, l'emprise des grandes propriétés a diminuée au profit des petites et moyennes, entraînant la construction de nouveaux mas. Cela s'explique par l'émiettement de certaines grandes propriétés qui n'étaient plus rentables et qui ont engendré une division parcellaire. En effet, les cultures irriguées nécessitaient une grande surveillance irréalisable en termes de coût à une telle échelle. Les eaux de la Durance et le développement du système d'irrigation, ayant rendu le sol plus fertile, ont eu pour conséquence l'extension des prairies. Les cultures fourragères se développent jusqu'à remplacer les vergers par le blé. Aujourd'hui le paysage est sensiblement identique à celui du 19^e siècle avec un accroissement des zones urbaines. Sur notre aire d'étude, cela concerne essentiellement Saint-Martin-de-Crau qui s'est nettement développé durant ce dernier siècle et dont certaines zones d'activités destinées surtout à la logistique et l'industrie ont vu le jour récemment. C'est le cas de la zone industrielle Bois de Leuze et la zone écopôle.

Ainsi, la Crau et la Camargue sont de vastes territoires agricoles qui ont peu évolués durant ce dernier siècle. Les activités anthropiques se distinguent surtout à travers l'agriculture intensive qui a subi de nombreuses mutations en Camargue mais également avec l'étalement urbain qui

impacte ces paysages agricoles. Par ailleurs, les réseaux de transports se sont nettement accrus avec l'apparition de la LGV il y a plus d'un siècle et le développement des infrastructures routières. Ces dernières se marquent d'autant plus par le projet de l'A54 qui ne cesse de s'imposer sur les paysages depuis plus de 40 ans.

Malgré les nombreuses réglementations politiques et avancées scientifiques, peu de territoires ne sont pas touchés par les activités humaines. Plus particulièrement, les infrastructures de transport fragmentent les territoires et limitent la connectivité des habitats des espèces animales ou végétales. Aujourd'hui, mesurer et analyser la fragmentation et la connectivité des habitats afin de restaurer un réseau écologique cohérent se placent comme des enjeux majeurs en termes de développement durable et de préservation des paysages et de la biodiversité.

Les importantes infrastructures de transports (LGV, autoroutes, voies express) qui découpent le territoire entre Salon-de-Provence et Arles forment un fuseau d'étude aux forts enjeux. Malgré la forte présence de l'homme et le fait que ce terrain d'étude est déjà fragmenté, les réseaux de transport et leurs importants enjeux socio-économiques doivent coexister avec les réseaux écologiques et une importante biodiversité. Par ailleurs, une description diachronique de la Camargue et de la Crau a également permis d'identifier l'existence d'une forte empreinte humaine sur ces territoires présente depuis plus d'un siècle avec l'exploitation des territoires pour l'agriculture. Il serait pertinent de prendre l'ensemble de ces changements en considération pour comprendre les fonctionnements des écosystèmes et de leurs évolutions. Dans tous les cas, il apparaît que d'importants enjeux paysagers et environnementaux peuvent exister sur notre terrain d'étude et il sera important de les mettre en relief afin d'analyser la transparence écologique.

Différents objectifs sont donc fixés :

- identifier les enjeux du fuseau d'étude en termes de paysages, d'habitats et de biodiversité ;**
- mettre en place une méthodologie permettant d'analyser la transparence écologique des infrastructures routières ;**
- définir les limites des jumelages routiers, soit le seuil de jumelage au delà duquel on ne peut plus considérer deux infrastructures de transport jumelées**
- qualifier les fonctionnalités des écosystèmes perturbés ;**
- identifier les services écosystémiques amputés ;**
- définir comment restaurer la transparence écologique d'une infrastructure.**

Chapitre 2 : Analyser la transparence écologique des infrastructures de transport avec les graphes paysagers

Différentes approches permettent d'analyser la manière dont coexistent les réseaux de transport et écologique. Certains auteurs tentent de mesurer la fragmentation du paysage à travers des indicateurs paysagers, d'autres prônent une approche par l'espèce afin de tenir compte des interactions de l'espèce avec l'espace dans lequel elle évolue. Le deuxième se rapproche plus de la réalité. Ce sera donc à travers une analyse de la connectivité des habitats que la transparence écologique des infrastructures de transport, sur le fuseau qui s'étend entre Salon-de-Provence et Arles, sera analysée.

Après avoir délimité le terrain d'étude et identifier les différents enjeux, il s'agira de cibler une espèce. Puis, les connaissances sur celle-ci seront approfondies à travers la littérature et permettront de mettre en place un modèle basé sur la théorie des graphes.

2.1 Identification des enjeux

Le fuseau d'étude traverse de nombreux paysages et territoires avec une biodiversité diversifiée et remarquable. L'objectif de cette partie est d'identifier les enjeux paysagers présents et qui permettront d'identifier une espèce cible. À partir de là, il sera possible d'analyser la transparence écologique des infrastructures à travers une espèce cible et tout en tenant compte des spécificités du territoire.

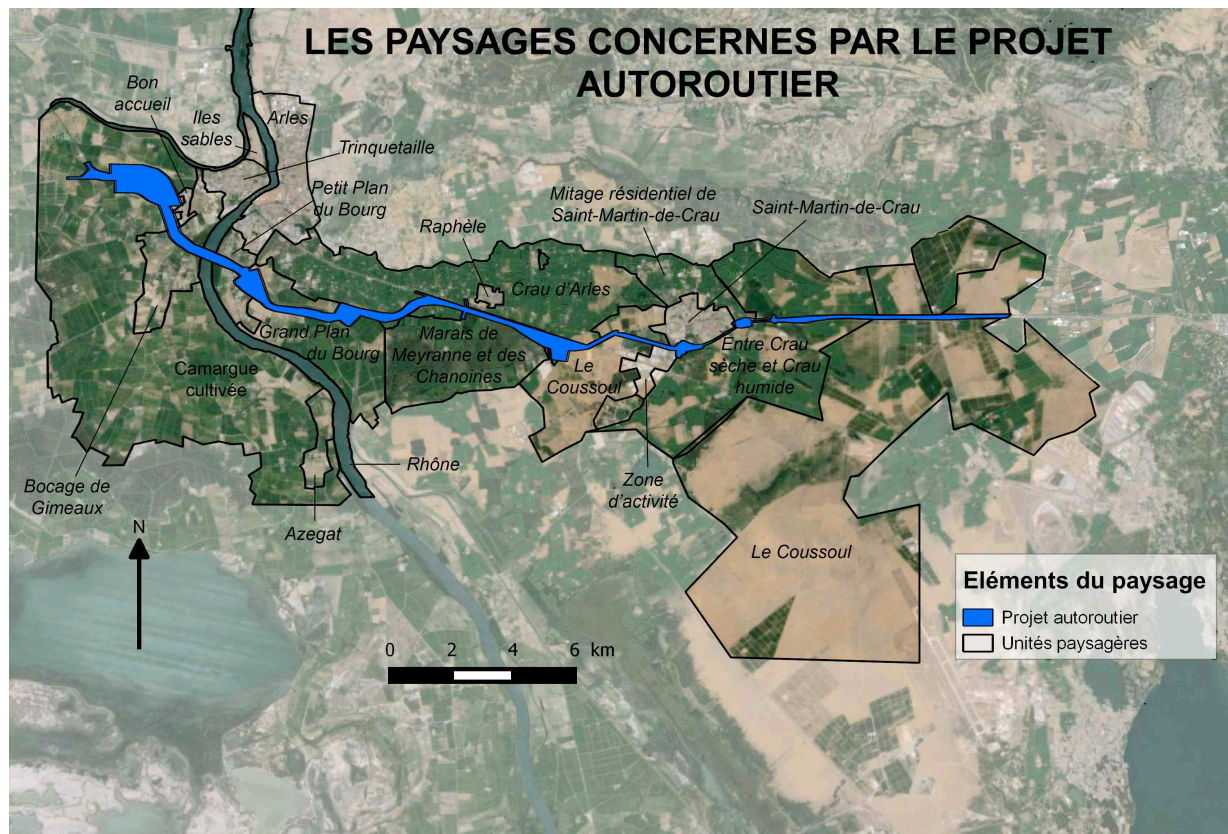
2.1.1 Les unités paysagères

L'analyse de la transparence écologique de notre fuseau d'étude ne peut pas se limiter à l'emprise physique de l'infrastructure de transport car l'impact est bien plus large et varie en fonction des paysages et des espèces présentes. Notre approche analytique s'appuiera sur les

unités paysagères traversées par le fuseau d'étude. En effet, il est possible de supposer des logiques propres à chaque unité et des interactions entre chacune d'elles. Plus précisément, on parlera d'unités écopaysagères, concept situé à l'interface des concepts de paysage et d'écosystème [Burel F. & Baudry J., 1999]. Cela permet de définir le territoire selon ses logiques spatiales et paysagères d'une part et ses caractéristiques écologiques, écosystémiques et biologiques d'autre part.

L'Atlas paysager [<http://www.cg13.fr/>], réalisé par l'ex Direction Départementale de l'Équipement (ex-DDE) des Bouches-du-Rhône et par l'ex Direction Régionale de l'Environnement (ex-DIREN) est un document servant de référence à l'échelle du département dans la connaissance du territoire. Il permet une première approche des différents paysages présents autour du projet autoroutier mais ne suffit pas pour décrire l'ensemble des unités paysagères car réalisé à une échelle territoriale trop large et donc non adaptée (Annexe 1 & Annexe 2). Les unités paysagères ont donc été redéfinies à partir d'un travail de terrain réalisé sur les entités paysagères constitutives et sur les ambiances locales, corroboré par un travail de photo-interprétation des dernières missions aériennes disponibles [CEREMA, ex-CETE Méditerranée, 2012]. Cette base de données, mise en place à l'échelle de la Camargue, des Alpilles et de la Crau, recense 24 unités. En ce qui concerne, le projet autoroutier, une requête spatiale (couche projet autoroutier intersecte couche unités paysagères) sur QGIS permet d'identifier 13 unités concernant notre étude. La nature n'aime pas les vides et pour cela des unités sont rajoutées afin de combler ces « *trous* ». On distingue donc 20 unités paysagères qui se placeront comme une base d'analyse dans ce travail (Carte 2).

Carte 2 Les unités écopaysagères concernées



Ainsi, l'ensemble de ces unités paysagères définiront le terrain d'étude et permettront de répondre aux objectifs précédemment fixés (Chapitre 1.3). Une première approche des paysages permettra d'analyser le territoire concerné par le fuseau d'étude.

2.1.2 Un territoire diversifié

Ce territoire est essentiellement composé de terres agricoles mais chacune des unités paysagères (Carte 2) présentent leurs spécificités [DIREN & DDE, 2007]. À l'aide de l'atlas paysagers [DIREN & DDE, 2007] et du diagnostic réalisé par le CEREMA [CEREMA, ex-CETE Méditerranée, 2012], les principales unités seront décrites.

Le Coussoul (Photo 3)

C'est un espace résiduel entre la Crau humide et les marais d'une part, et les terres irriguées gagnées sur le Coussoul au Sud de Saint-Martin-de-Crau.

Photo 3 Vaste étendue sèche du Coussoul vue depuis la RN113 (Source : GoogleStreetView, 2013)



Il se caractérise par des steppes qui s'étendent sur l'ancien lit de la Durance et forment de vastes espaces plans. La lande caillouteuse sèche contraste avec l'espace arboré du marais et des herbages de la Crau d'Arles, les nouvelles cultures de vergers, les activités militaires de la Dynamite et l'empreinte urbaine de Saint-Martin-de-Crau.

Les vergers qui ont récemment gagnés du territoire sur le Coussoul ont participé au développement d'un nouveau relief caractérisé par de hautes haies de peupliers, plantées pour protéger les cultures du vent. Malgré une physionomie différente, les zones d'épandages de la nappe phréatique du Sud de Saint-Martin-de-Crau avec ses prairies sont intégrées à cette unité.

Espaces hétérogènes : entre Crau sèche et Crau humide (Photo 4)

Cette unité paysagère se caractérise par son hétérogénéité. En effet, on ne distingue pas une monoculture dominante ou une structure homogène mais une combinaison de plusieurs

Photo 4 Herbages et haies de cyprès (Source : éléments caractéristiques de polycultures. CEREMA, ex-CETE Méditerranée 2012)



Le paysage est donc très diversifié et relativement ouvert. Aux abords de la RN113 et de l'A54, on distingue une vaste trame régulière et géométrique de haies de peupliers qui se caractérise par une succession de différentes cultures (prairies, herbages, labours, serres,...) et de boisements résiduels denses qui limitent l'ouverture de vastes prairies. Plus au Sud et

Sud-Est, le parcellaire situé à proximité de Saint-Martin-de-Crau et de la zone d'activités est essentiellement occupé par des herbages verdoyants de taille moins importante qu'au Nord de

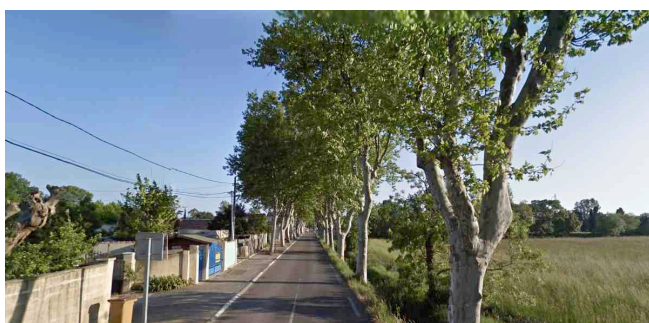
l'unité. Cet espace s'apparente plus aux herbages de la Crau d'Arles mais avec des haies plus denses et plus hautes, on y trouve de nombreuses cultures de fruits qui forment des îlots organisés de manière régulière.

Mitage résidentiel de Saint-Martin-de-Crau (Photo 5)

Cette unité paysagère se caractérise par le développement de la périurbanisation à Saint-Martin-de-Crau qui se traduit par une multiplication des résidences dans un espace agricole. Le tissu urbain prend donc peu à peu de l'ampleur dans cet espace sous forme de résidences pavillonnaires, notamment à l'Ouest de

Photo 5 Vue depuis la RD27 : résidence à gauche, herbages à droite (Source : GoogleStreetView, 2013)

l'unité. De nombreux mas sont également présents. Au milieu de ces espaces urbanisés de manière diffuse, se distingue des espaces agricoles dominé par des prairies où les parcelles sont coupées par de hautes haies. De manière moins importante, lorsque l'on s'approche de Saint-Martin-de-Crau, certaines cultures sont présentes comme les céréales.



Zone d'activité de Saint-Martin-de-Crau (Photo 6)

Le territoire de Saint-Martin-de-Crau est soumis à de fortes pressions liées à l'urbanisation qui s'étale de plus en plus dans les espaces périurbains. C'est le cas de ce secteur au sud de la ville et de la RN113, dans le Coussoul, avec un espace plat et propice au développement d'activités tournées essentiellement vers la logistique. Aujourd'hui, c'est encore un espace en pleine mutation où les activités agricoles tendent à laisser place progressivement aux activités industrielles.

Photo 6 Écopôle (Source : CEREMA, ex-CETE méditerranée, 2012)



La Crau d'Arles (ou la Draille marseillaise) (Photo 7)

Cette unité paysagère correspond au secteur le plus anciennement irrigué de la Crau. Après la création du canal de Craponne, le paysage a radicalement été modifié. Les eaux chargées en limons ont favorisé la création de prairies fournissant un foin de grande qualité.

La RN113 crée une coupure sur cette entité et a constitué deux sous-ensembles avec peu de liens physiques, à part au travers de quelques ouvrages de franchissement et des quelques vues possibles :

- au Nord de la route, le bocage de Raphèle
- au Sud de la RN113, la Draille marseillaise, moins soumise à la pression urbaine, est plus préservée.

Photo 7 Vastes parcelles et mas vues depuis la RN113 (Source : GoogleStreetView, 2013)

Les paysages sont formés d'herbages, partiellement cloisonnée, qui contrastent avec le Coussoul sec et ouvert à l'Ouest. De nombreux mas anciens ainsi que le dense réseau de chemins qui les relient marquent également le paysage. Les parcelles sont relativement petites et orientées Est-Ouest formant une trame régulière parfois délimitée par de petites haies.



Le paysage a peu évolué mais on note tout de même le développement de l'urbanisation qui se fait un peu ressentir. C'est le cas notamment de l'hôpital créé en 1970 et du centre de vacances inauguré dans les années 80.

Les marais de Chanoines et de Meyranne (Photo 8)

Cette unité paysagère correspond essentiellement à la zone des deux marais (Chanoines et Meyranne) situés sur la zone d'épandage de la nappe phréatique de la Crau, entre la Crau camarguaise et le Coussoul.

Ce sont des zones marécageuses limitées au Nord par la RN113 et au Sud par la RD24 avec un paysage constitué de vastes prairies. Ces marais sont des milieux semi-naturels avec une importante richesse écologique.

Photo 8 Remontée de la nappe phréatique dans les canaux de drainage (Source : CEREMA, 2012)



Grand Plan du Bourg (Photo 9)

Photo 9 Champs de blé au sud de la tour d'Aling (Source : CEREMA, 2012)



Cette unité se caractérise par des paysages ouverts composés de grands parcellaires en damier entourés de grandes roubines de drainage. Espaces très semblables à la Camargue, les cultures sont majoritairement le riz, et, plus secondairement, les céréales. Les paysages très ouverts (aucun relief et grandes parcelles) sont parfois rompus par la présence de mas et de nombreux bâtiments agricoles.

Autour de cet ensemble, on note la présence d'arbres et de longues allées qui rompent le rythme régulier des cultures.

Petit Plan du Bourg (Photo 10)

Cette unité paysagère, au Sud d'Arles, se constitue essentiellement de sols fertiles créés par les débordements du Rhône qui ont permis le développement de cultures maraîchères et d'un bocage. Le paysage est très agricole et parsemé de quelques mas situés près des routes derrière des haies. Les cultures très diversifiées (vignes, blé, prés) sont souvent réalisées sur des parcelles de petites tailles. Au Nord, de

nombreuses haies séparent les cultures et les protègent du mistral donnant une certaine fermeture au paysage. En allant vers le sud le paysage s'ouvre progressivement pour laisser place aux rizières du Plan du Bourg. Le petit Plan du Bourg se caractérise par de petites exploitations agricoles à l'origine d'un paysage de polyculture avec des vignobles, des arbres fruitiers, des vergers, du blé, du colza, du maraîchage, des serres, etc.

Photo 10 Vignoble du mas Saint Vincent (Source : CEREMA, 2012)



Le Rhône (Photo 11)

Cette unité se définit par le fleuve et sa ripisylve qui forme un linéaire quasi-continu, ferme l'horizon, cadre le « couloir » du Rhône. Contrairement aux paysages très plats et très ouverts qui sont à proximité, cette unité paysagère se distingue par la hauteur de sa végétation. Enfin, le long du fleuve, on distingue un certain nombre de stations de pompage.

Photo 11 Le Rhône vu depuis le pont de la RN113 d'Arles (Source : GoogleStreetView, 2013)



Le bocage de Gimeaux (Photo 12)

Photo 12 Verger et canal d'irrigation à l'est de la RD570 (Source : CEREMA, 2012)

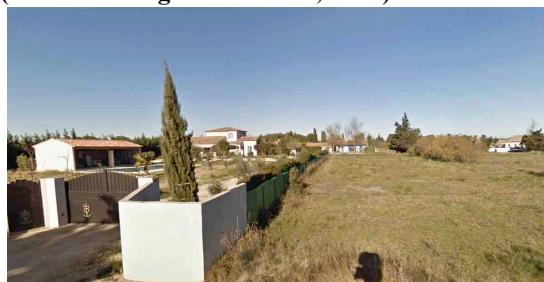


Le paysage est cloisonné par des haies de cyprès, de saules, de peupliers ou par les roseaux le long des canaux d'irrigation ou des fossés de drainage. Les cultures sont essentiellement maraîchères, mais on trouve également des vergers, des vignes, champs de blé, prés et quelques serres. Le bâti est présent sous forme de hameaux (hameau de Gimeaux notamment), de petits mas et de pavillons. Ce paysage tend à disparaître avec la pression urbaine, d'autant plus qu'Arles a inscrit le secteur en zone à urbaniser.

Bon accueil (Photo 13)

Bon accueil se situe entre le bocage de Gimeaux et la Camargue cultivée. Cette petite unité paysagère correspond à une zone de résidences pavillonnaires en périphérie d'Arles.

Photo 13 Quartier résidentiel de Bon Accueil (Source : GoogleStreetView, 2013)



La Camargue cultivée (ou haute Camargue) (Photo 14)

Le paysage est ouvert avec de grandes parcelles géométriques. La Camargue cultivée se distingue également par son réseau d'irrigation structuré et en avec le petit Rhône. Cette unité paysagère a subi de nombreux changements. Destinée à la culture de blé, puis à la vigne, elle est aujourd'hui dominée par la culture de riz. Ce territoire très plat et ouvert se caractérise par sa quasi-absence de végétation arbustive ou arborée.

Photo 14 Rizières et roselières au nord du mas Angeline (Source : CEREMA, 2012)



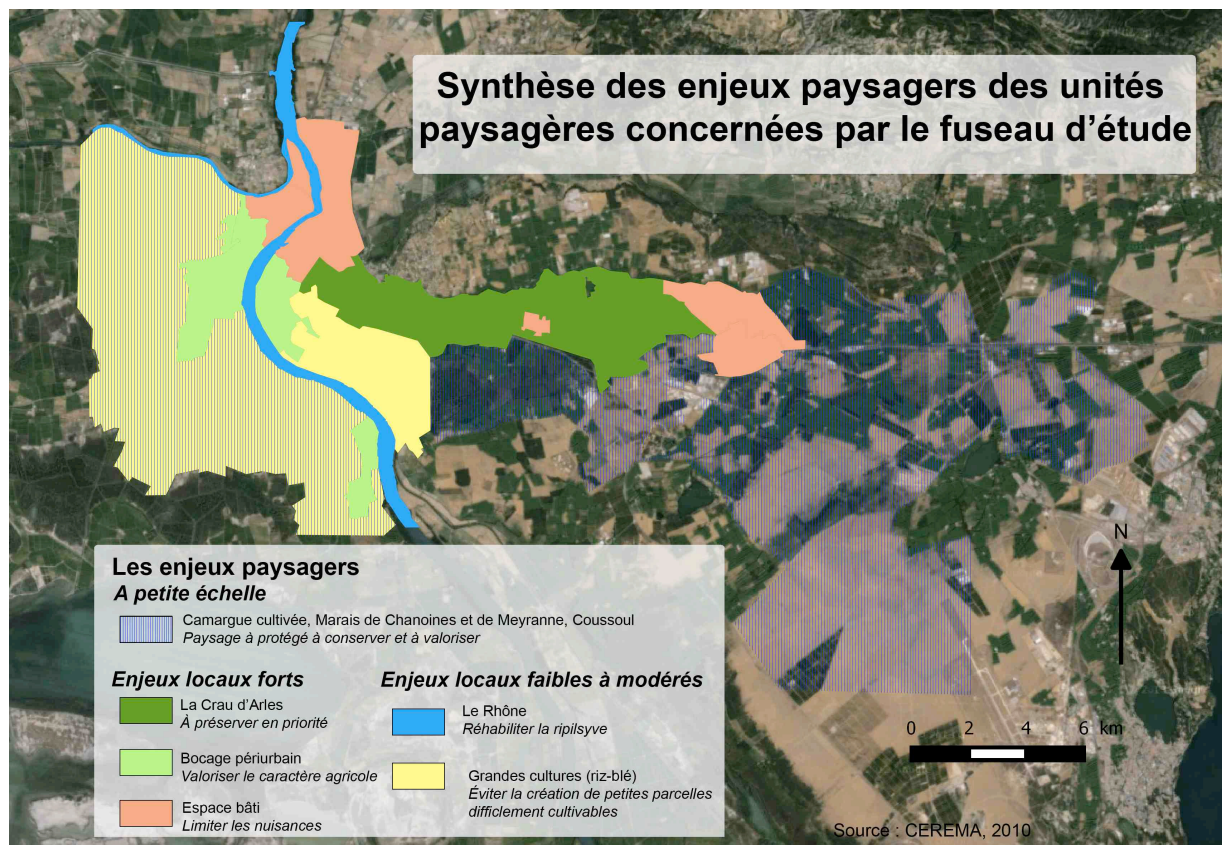
Ainsi, à l'ouest, les paysages de la Crau sont souvent plus ouverts, les terres souvent plus sèches et les parcelles souvent vierges de cultures. Ces espaces contrastent avec les paysages de la Camargue, où les cultures sont nombreuses et souvent destinées à la riziculture. En réalité, chaque unité paysagère présente des caractéristiques qui lui sont propres, ce qui offre de nombreux et divers paysages sur notre terrain d'étude.

2.1.3 *De nombreux enjeux paysagers et environnementaux : de nombreux habitats concernés*

Comme nous l'avons vu précédemment (paragraphe 0), notre terrain d'étude se compose d'une mosaïque de paysages. Les enjeux sont donc nombreux en ce qui concerne les paysages ce qui implique d'importants enjeux en termes d'habitats et de biodiversité.

Tout d'abord, un diagnostic du CEREMA [CEREMA, ex-CETE Méditerranée, 2012] distingue deux grands types d'enjeux paysagers : à petite échelle et localisée (Carte 3).

Carte 3 Synthèse des enjeux paysagers



Les enjeux à petite échelle

Le parc de la Camargue constitue un enjeu majeur. Des enjeux économiques et écologiques ressortent à travers une agriculture et un élevage important. On note également de nombreux enjeux en termes d'usage de l'espace notamment pour la chasse, la pêche et le tourisme. La Camargue est classé en zone Natura 2000 et se place également comme une zone avec une importante richesse faunistique et floristique, et de nombreuses espèces protégées.

Les marais de Chanoines et de Meyranne ainsi que certains espaces environnants, ont été identifiés comme espaces d'intérêt communautaire et devant intégrer le réseau Natura 2000. Leur sensibilité écologique est importante. Dominés par la riziculture et les prairies de foin, ces deux activités ont un impact direct sur le fonctionnement hydraulique de ces zones.

La ripisylve du Rhône constitue un enjeu au niveau de la préservation des espèces. Les boisements denses, notamment, accueillent différentes espèces d'oiseaux, de mammifères et d'amphibiens.

Les enjeux localisés

Les enjeux forts renvoient à des conséquences d'une détérioration, d'une suppression ou de perturbations durables importantes. Différentes zones sont concernées :

- la draille marseillaise (Grau d'Arles), déjà très morcelée, est sensible à toute perturbation de par notamment les interactions des composantes paysagères. Le foin est également un fort enjeu économique. Les mas ont un intérêt paysager car ils représentent une composante essentielle du bâti. Toute coupure nouvelle pourrait mettre en péril le fonctionnement et l'identité même de la draille : il est donc prioritaire que cette unité soit le moins possible pénalisée ;
- Le paysage fermé des bocages périurbains offre une composition de cultures et de structures végétales variées et intéressantes mais très fragiles. L'enjeu est de pérenniser la composition existante en détériorant le paysage le moins possible ;
- Certaines zones habitées se situent à proximité et l'infrastructure doit être le moins perceptible possible. Ceci est d'autant plus délicat que de nombreux paysages sont très ouverts.

Les enjeux faibles à modérés correspondent à des conséquences de la détérioration des paysages ou des composantes paysagères limitées ou avec de faibles importances :

- la ripisylve du Rhône pourrait être supprimée sur quelques dizaines de mètres créant de nouvelles trouées. Il est donc important de minimiser les coupures physiques.
- Les parcelles des cultures de riz et de blé participent à l'identité de ces unités paysagères. Chaque espace a un lien direct avec le système d'irrigation et de drainage et peu de terrain est abandonné. Il faut donc limiter le morcellement des parcelles qui pourrait entraîner l'abandon de certains espaces ou les rendre difficile à cultiver.

Ainsi, de nombreux enjeux en termes d'habitats et de biodiversité existent sur l'ensemble du terrain d'étude. Les unités paysagères situées dans la Camargue sont de plus toutes classées en zone Natura 2000 et abritent une importante richesse faunistique et floristique. On note également l'importance du réseau hydrographique et des systèmes d'irrigation qu'il est indispensable de préserver. Enfin, les mas sont très présents sur l'ensemble du terrain d'étude et marquent l'identité de la plupart des paysages.

2.1.4 *Le choix d'une espèce cible : les chiroptères*

Les territoires de la Camargue et de la Crau, et plus précisément de notre terrain d'étude, abritent de nombreux habitats et une importante biodiversité avec de nombreuses espèces protégées ou patrimoniales.

Tout d'abord, on peut distinguer 5 grands type d'habitats remarquables sur l'aire d'étude [CEREMA, ex-CETE Méditerranée, 2012] :

- les habitats aquatiques
- les habitats humides
- les habitats pelousaires
- les habitats prairiaux
- les habitats forestiers.

Les plus représentés sont les habitats prairiaux que l'on retrouve sur l'ensemble du terrain d'étude. Lorsque l'on s'approche de la Camargue les zones humides sont de plus en plus présentes. Par ailleurs, comme on l'a vu précédemment (chapitre 2.1.3), les haies ainsi que le réseau hydrographique tiennent une place importante. La présence de mas, qui rompt parfois le paysage, est aussi emblématique de notre aire d'étude. Enfin, un recensement du bureau d'étude BIOTOPE (2012)³ a identifié les espèces présentes et celles qui présentaient le plus d'intérêt en distinguant les enjeux de chacune (Tableau 3).

³ Ce recensement correspond à des observations de terrain : la géolocalisation d'une espèce est supposé (habitat observé avéré ou potentielle, comme un terrier) ou réel (observation de l'espèce dans son habitat). Il a été réalisé pour le CEREMA dans le cadre du projet ITTECOP.

Tableau 3 Enjeux des espèces présentes sur le terrain d'étude d'après BIOTOPE (2012)

	Espèce	Protection nationale	Directive Habitat	Précision	Enjeu à l'échelle locale
Insectes	Cordule à corps fin	2	An. II et IV	ZNIEFF PACA	Moderé
	Decticelle des ruisseaux	-	-	ZNIEFF PACA	Fort
Amphibiens	Rainette méridionale	2	An. IV	Risque de disparition faible	Faible
	Grenouille rieuse	3	An. V	Risque de disparition faible	Faible
Reptiles	Cistude d'Europe	2	An. II et IV	Menacé	Fort
	Couleuvre de Montpellier	3	-	Risque de disparition faible	Faible
	Couleuvre Vipérine	3	-	Risque de disparition faible	Faible
	Lézard des murailles	2	An. IV	Risque de disparition faible	Faible
	Couleuvre à collier	2	-	Risque de disparition faible	Faible
Mammifères (hors chiroptères)	Loutre d'Europe	oui	An. II et IV	En danger	Fort
	Crocodile aquatique	oui	-	Risque de disparition faible	Fort
	Putois Mustela	non	-	Risque de disparition faible	Faible
Chiroptères	Grand Rhinolophe	oui	An. II et IV	ZNIEFF PACA. Espèce remarquable vulnérable	Fort
	Minioptère de Schreibers	oui	An. II et IV	ZNIEFF PACA. Espèce remarquable vulnérable et menacé	Fort
	Murin à oreilles échancrées	oui	An. II et IV	ZNIEFF PACA. Espèce remarquable à surveiller	Fort
	Petit murin	oui	An. II et IV	ZNIEFF PACA. Espèce remarquable vulnérable	Fort
	Barbastelle d'Europe	oui	An. II et IV	ZNIEFF PACA. Espèce remarquable vulnérable et menacé	Moderé
	Pipistrelle de Nathusius	oui	An. IV	ZNIEFF PACA. Espèce remarquable à surveiller	Moderé
	Grand murin	oui	An. II et IV	ZNIEFF PACA. Espèce remarquable vulnérable	Faible
	Grande Noctule	oui	An. IV	ZNIEFF PACA. Espèce remarquable vulnérable et menacé	Faible
	Molosse de Cestoni	oui	An. IV	ZNIEFF PACA. Espèce remarquable rare	Faible
	Murin de Daubenton	oui	An. IV	ZNIEFF PACA. Espèce remarquable à surveiller	Faible
	Noctule commune	oui	An. IV	ZNIEFF PACA. Espèce remarquable à surveiller	Faible
	Nocutle de Leiser	oui	An. IV	ZNIEFF PACA	Faible
	Oreillard gris	oui	An. IV	ZNIEFF PACA. Espèce à surveiller	Faible
	Pipistrelle commune	oui	An. IV	ZNIEFF PACA. Espèce à surveiller	Faible
	Pipistrelle soprane	oui	An. IV	ZNIEFF PACA	Faible
	Pipistrelle de Khul	oui	An. IV	ZNIEFF PACA. Espèce à surveiller	Faible
	Sérotine commune	oui	An. IV	ZNIEFF PACA. Espèce à surveiller	Faible
	Vespère de Savi	oui	An. IV	ZNIEFF PACA. Espèce à surveiller	Faible
Oiseaux	Aigrette garzette	Direction oiseaux	-	Espèce protégée à surveiller	Faible
	Martin-pêcheur d'Europe	Direction oiseaux	-	Espèce protégée à surveiller	Faible
	Milan noir	Direction oiseaux	-	Espèce protégée à surveiller	Faible
	Sterne hansel	Direction oiseaux	-	Espèce protégée à surveiller	Faible
	Grèbe castagneux	-	-	Espèce protégée à surveiller	Faible

De nombreuses espèces présentent des enjeux à l'échelle de notre terrain d'étude. Plus particulièrement, plusieurs chiroptères (Photo 15) présentent des enjeux forts et ont été observés sur l'ensemble de l'aire d'étude. Ces espèces sont protégées et assurer leur survie est important. Par ailleurs, précédemment (chapitre 0 & 2.1.3), il a été relevé de nombreuses haies ainsi qu'un important réseau

hydrographique. Ces deux entités sont primordiales pour le déplacement de ces espèces. De plus, il est possible de supposer des échanges saisonniers entre les Alpilles d'un côté et la Camargue et une partie de la Crau de l'autre. En outre, un relevé du CEREMA (2010), pour le programme LIFE+

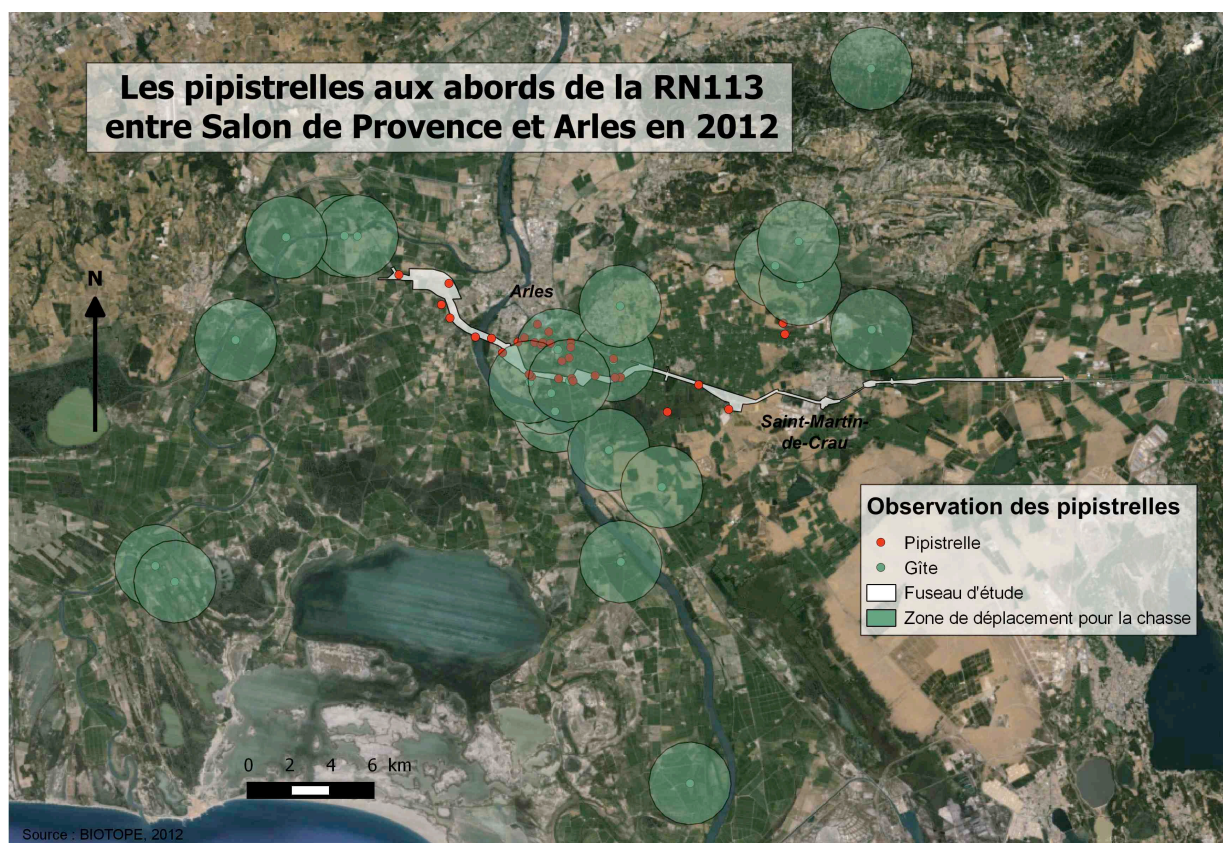
ChiroMed, avait recensé les cadavres présents sur la portion de RN113 entre Saint-Martin-de-Crau et Arles. Il avait été mis en évidence le fait que les chiroptères étaient les espèces les plus touchées par les collisions : 88 sur 108 cadavres soit plus de 80%.



Enfin, parmi les chiroptères, tous ne présentent pas les mêmes enjeux et ne sont pas présents de la même manière sur le terrain d'étude. Parmi les cadavres relevés en 2010, le groupe des pipistrelles (Photo 15) était le plus touché représentant plus de 75 % des cadavres de chiroptères. Ce constat est conforté par les données d'observation du bureau d'étude BIOTOPE (2012) où le groupe des pipistrelles représentent plus d'un quart des observations.

Ainsi, l'analyse de la transparence écologique des infrastructures de transports pour les pipistrelles est un enjeu majeur sur notre fuseau d'étude. Ces espèces sont très fidèles à leurs gîtes et espaces de chasse [Arthur L. et Lemaire M., 1999]. Elles vivent aussi bien dans des espaces arboricoles (trous de pic, fentes, fissures, arbres) que des espaces anthropiques (villes, villages, parcs et jardins) [http://www.onf.fr]. Chaque nuit, elles peuvent se déplacer jusqu'à 2 km pour aller chasser des insectes, préférentiellement en lisière de forêt et au dessus des points d'eau. L'hiver, elles parcourent jusqu'à 20km, en moyenne, pour hiverner. En ce qui nous concerne, il est possible que les Alpilles soient un secteur d'hivernage et on suppose des échanges entre cette entité et la Camargue [http://www.life+chiromed.fr]. Les données d'observation (BIOTOPE, 2012) montrent que les pipistrelles sont nombreuses aux abords du fuseau d'étude (Carte 4).

Carte 4 Localisation de la pipistrelle aux abords de la RN113 en 2012



Les infrastructures de transport pourraient donc agir comme des barrières à leur déplacement. Certains gîtes ont également été relevés et on note notamment une forte présence entre Arles et Saint-Martin de Crau. Par ailleurs, les pipistrelles pouvant se déplacer jusqu'à 2 km par nuit pour aller chasser, des buffers correspondant à cette distance ont été tracés sur la localisation des gîtes afin d'observer leurs aires de déplacement potentiel. Plusieurs de ces aires sont impactées par le tracé routier étudié.

2.2 Différentes approches possibles

Afin d'analyser la transparence écologique de l'infrastructure routière étudiée, il est nécessaire de mettre en place une méthode qui permette de mesurer ce concept. Par ailleurs, il peut être pertinent de comprendre comment le territoire a évolué pour appréhender son état actuel ainsi que de prospecter son état futur, c'est à dire après la mise en place du contournement autoroutier d'Arles.

2.2.1 Difficulté d'une approche diachronique

Précédemment il a été souligné que le paysage avait subi peu de modifications et est depuis très longtemps dominé par l'agriculture (chapitre 1.3.3). Cependant, certains phénomènes majeurs ont pu avoir un impact plus ou moins important. Il est donc pertinent de tenter de les analyser. Cela pourrait être intégré dans un futur modèle d'analyse diachronique. Pour cela, deux méthodes et deux types de données sont disponibles gratuitement :

- les photos aériennes par avion
- les images satellites.

2.2.1.1 Les photographies aériennes par avion

Les photographies aériennes correspondent à des clichés pris avec un appareil photographique orienté verticalement d'un avion. Celui-ci effectue des parcours parallèles vers un point cardinal [Spurr S.H., 1960]. Pour la cartographie et l'interprétation photographique, les vues sont prises avec une inclinaison de moins de 3 degrés.

Les photos aériennes de l'IGN sont disponibles (souvent gratuitement) à plusieurs pas de temps depuis 1926.

Elles permettent d'observer plusieurs phénomènes, notamment :

- l'intensification des activités agricoles depuis la seconde moitié du 20^e siècle. En Camargue notamment, entre 1944 et 1988, cela se traduit par l'apparition de nombreuses rizicultures et terrains de maraîchage (Annexe 3) ainsi que l'urbanisation du delta du Rhône [Blot E. et al., 2012] ;
- l'étalement urbain des villes et notamment d'Arles dans la seconde moitié du 20^e siècle. Cela se marque en particulier par la périurbanisation, la création de logements sociaux en périphérie dans les années 70, la création de zones d'activités industrielles et commerciales comme la grande ZAC de Fourchon au Sud-Est de la ville (Annexe 4) [Blot E. et al., 2012] ;
- la densification du réseau routier sur les photographies aériennes. On note également la mise en place de la RN 113 à travers Arles et la création du pont de la RN 113 sur le Rhône, inauguré en 1969. Bien plus tard, dans les années 90, l'autoroute A54 est apparue entre Salon-de-Provence et Saint-Martin-de-Crau (Annexe 4).

Ainsi, de nombreux phénomènes sont observables qui sont, de plus, très pertinents pour notre analyse. Ces photographies aériennes montrent comment le paysage a évolué depuis plus de 80 ans. Cependant, les données sont disponibles à des échelles trop fines ce qui impliqueraient un travail de géolocalisation d'un trop grand nombre d'images pour couvrir l'intégralité du terrain d'étude. Elles ne seront donc pas utilisées pour la suite des travaux.

2.2.1.2 Les images satellites

Les images satellites sont des images de la Terre (ou d'autres planètes) prises à partir de satellites artificiels. Les capteurs du satellite sont sensibles à une ou plusieurs longueurs d'onde et mesurent pour une longueur d'onde donnée ce que lui envoie chaque « *point* » de la surface du sol. Les images peuvent être analysées à travers des logiciels de télédétection et offrent, depuis quelques années, une très bonne précision.

Peu d'images sont téléchargeables gratuitement. En ce qui nous concerne, les bases de données Landsat (GLCF) sont disponibles, pour les années 1975, 1989, 2001 et 2004. Les images satellites brutes disponibles sur le site GLCF (<http://glcf.umd.edu/data>) doivent être traitées pour être colorées et afin que l'on obtienne un rendu en « *fausse couleur* ». Pour cela, la méthodologie employée est la suivante :

- téléchargement des canaux 10 / 20 et 30
- chaque image (format TIFF et donc géocodé) est découpée à l'aide du logiciel QGIS afin de se restreindre à notre zone d'étude
- les images sont ouvertes avec logiciel Monteverdi (gratuit)
- elles sont concaténées de la manière suivante : le canal 10 correspond au canal rouge, le canal 20 au vert, et le canal 30 au bleu
- le résultat est exporté en TIFF
- une analyse par classification, comme les k-means proposées par Monteverdi, peut être mise en place afin d'extraire les informations souhaitées [Péteri R. et al., 2003]. Cette dernière étape ne sera pas utilisée.

Entre 1989 et 2004, le paysage a peu évolué. On distingue encore de nombreuses terres agricoles et peu d'espaces urbanisés. Cependant, les images satellites montrent l'apparition de l'autoroute A54 entre Salon de Provence et Saint-Martin-de-Crau. La première portion a été inaugurée dans les années 70 au Sud de Salon-de-Provence sous forme d'une voie rapide (section Pélissanne – Grans). Puis, dans les années 90 le tronçon entre Arles et Nîmes est inauguré. En 1996, la portion entre Salon-de-Provence et Saint-Martin-de-Crau est mise en service (section Saint-Martin-de-Crau – Grans) (Annexe 5).

Les images satellites disponibles gratuitement ne remontent pas assez loin dans le temps et ne permettent pas d'analyser les grandes évolutions des réseaux de transports, comme l'apparition de la voie ferrée au XIXe siècle ou encore la mise en place de la RN113. De plus, le pas de temps 1975 a une résolution plutôt médiocre et est inexploitable. Les trois pas de temps restants sont bien trop récents et comme nous l'avons vu précédemment le paysage a peu évolué ces dernières années (chapitre 1.3.3).

Ainsi, malgré la pertinence d'une approche diachronique pour cette étude, il paraît difficile de la mettre en œuvre. Peu de données sont disponibles gratuitement. De plus, traiter les images par des méthodes de classification serait chronophage. Cette approche sera donc mise à l'écart mais pourrait faire l'objet d'une autre étude. Plus particulièrement, cela permettrait d'analyser l'effet des jumelages couplés à la modification de l'espace. Dans notre cas, l'impact des jumelages pourra être simulé sans tenir compte des changements de l'occupation du sol qui ont eu lieu. Comme nous l'avons vu précédemment, peu d'évolution sont survenues sur les paysages étudiés, nous partirons donc de l'hypothèse qu'ils n'ont eu aucun effet sur l'espèce étudiée.

2.2.2 *La théorie des graphes*

Dans le chapitre 1.2.3, nous avons vu comment de nombreux auteurs ont tenté de mesurer la fragmentation et ont soulevé la limite de ne pas tenir compte des espèces présentes. Il a également été question, pour pallier à cela, d'utiliser la théorie des graphes, appelée parfois, en écologie du paysage, les graphes

paysagers [Foltête J.-C. et al., 2012]. Par ailleurs, le choix d'une approche sur la distribution des espèces nécessite de se focaliser sur une ou plusieurs espèces en particulier. Dans notre cas, les pipistrelles (chiroptères) (Photo 16)

Photo 16 Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus*) Réal. L. Arthur



ont présenté un enjeu particulièrement important sur le terrain d'étude (chapitre 2.1.4).

La naissance de la théorie des graphes renvoie généralement au problème des ponts de Königsberg décrit par le mathématicien suisse Leonhard Euler, au milieu du XVIII^e siècle [Euler L., 1741]. Cela consistait à trouver un chemin de promenade à partir d'un point donné où l'individu ne traversait qu'une seule fois les sept ponts tout en revenant au point de départ. Peu à peu les modèles mathématiques se sont complétés et complexifiés. En sciences sociales, cette méthode est très utilisée pour l'analyse des réseaux, notamment de transport. Récemment elle a été mise au goût du jour en écologie du paysage [Bunn A.G. et al., 2000 ; Ricotta C. et al., 2000 ; Uban D.L. et Keitt T.H., 2001] afin de pouvoir analyser la connectivité paysagère. À travers cette méthode, il sera possible d'analyser la transparence écologique et les solutions à mettre en œuvre pour la restaurer dans les zones les plus pertinentes.

Cette méthode nécessite donc trois grandes étapes [Foltete J.-C. et al., 2011] :

- cartographie du paysage. Il est indispensable de connaître l'espèce étudiée afin de définir le paysage via des données géographiques (habitat préférentielle, mode de vie et comportement). Cela permet de mettre en place une nomenclature des éléments du paysage afin de définir et de cartographier le « *paysage* » de l'espèce.
- modélisation de la connectivité de l'habitat par des méthodes fondées sur les graphes paysagers.
- calcul des métriques de connectivités.

Des étapes supplémentaires permettraient d'obtenir des modèles de distribution des espèces mais, dans notre cas, ils n'apporteraient aucune plus value. De plus, ces modèles nécessitent des données d'observation qui ne sont pas disponibles sur tout le fuseau d'étude et qui pourrait donc amener à des conclusions erronées. La théorie des graphes permettra de calculer différentes métriques avec différentes pondérations du paysage. Tout cela pourra être réalisé à différents pas de temps (avant et après le projet de contournement notamment) afin d'analyser l'impact de cette future infrastructure de transport.

2.3 *Cartographie du paysage pour la mise en place d'un modèle d'analyse basé sur la théorie des graphes*

Cette étape nécessite une bonne connaissance de l'espèce afin de pouvoir définir le paysage tel qu'elle le perçoit. D'après la littérature [Arthur L. & Lemaire M., 1999 ; Schober W. & Grimmberger E., 1991] et certaines fiches d'informations disponibles sur internet [<http://www.corif.net> ; <http://www.onf.fr> ; <http://www.lpo.fr>], on retient donc :

- la pipistrelle est anthropophile et vit aussi bien dans les espaces urbains (villes, villages, mas, parcs, jardins, etc.) que dans les forêts (ripisylves, trous de pics, fentes, fissures, arbres creux, etc.) ;
- la nuit, elle chasse les insectes jusqu'à 2 km autour de son gîte. Ses terrains de chasse favorisés sont les plans d'eau, les cours d'eau mais également les forêts et les zones humides ;
- les pipistrelles vivent en colonies de 10 à 20 individus généralement. Lors de la période de reproduction (avril-mai), les femelles peuvent changer de site assez fréquemment en groupe d'en moyenne 80 ; les mâles sont solitaires ou en petits groupes et attendent la visite des femelles (jusqu'à 10 par mâle) dans leur gîte pour s'accoupler ;
- les colonies peuvent se déplacer jusqu'à 20 km pour hiverner et retrouvent leur ancien gîte à l'arrivée des jours plus chauds ;
- elle se déplace à l'aide d'ultrasons. Sa mobilité dépend de la structure linéaire du paysage (haies, ripisylve, cours d'eau, lisières, murs, etc.) et les paysages ouverts ne lui sont pas favorables.

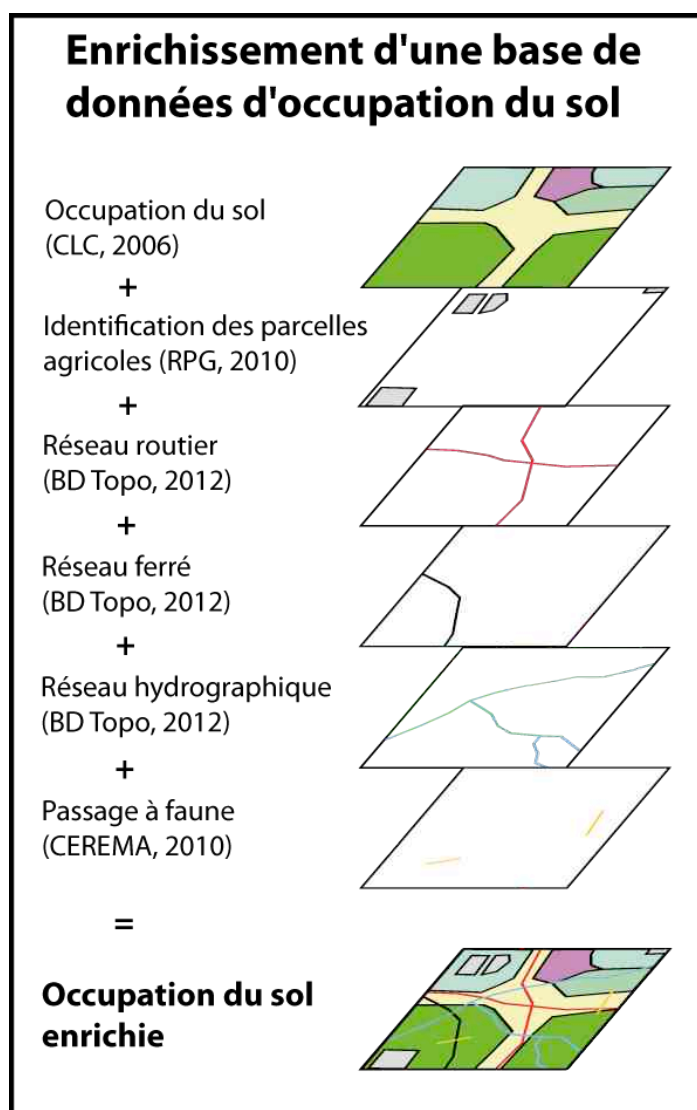
2.3.1 *Sources de données et premiers traitements*

En France, il existe une importante source de données permettant de représenter le paysage et dont la disponibilité varie selon le territoire étudié. Afin de qualifier au mieux le territoire, quatre bases de données ont été retenues :

- Corine Land Cover (2006), réalisée par le Service de l'Observatoire Statistiques du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD) du Ministère de l'Écologie, pour l'occupation du sol. Le niveau 3 permet de définir le paysage selon 44 postes
- la BD Topo (2012), fournie par l'IGN, permet d'identifier les cours d'eau, les réseaux de transports (routes et voies ferrées), ainsi que la végétation
- le RPG (2010), fournie par l'IGN, identifie les zones de cultures déclarées par les exploitants
- relevés de terrain du CEREMA (2010) pour identifier les passages à faune sur l'A54 et la RN113.

Ces bases de données sont croisées et permettent de définir le territoire de la manière la plus précise possible, chacune apportant une information différente (Figure 6). Pour cela, afin de pouvoir les croiser, les tables sont toutes simplifiées en deux variables : la surface qui est calculée à l'aide de QGIS (\$area) et la nature de la parcelle. La couche CLC est découpée avec la couche RPG, et les deux couches finales sont concaténées : ce qui était défini comme « *terres arables* » sur CLC est maintenant précisé. Puis, la couche obtenue est découpée avec la BD Topo et concaténée de la même manière que précédemment : toutes les routes et cours d'eau sont intégrés ainsi que les données relatives à la végétation présente. Notons que le réseau

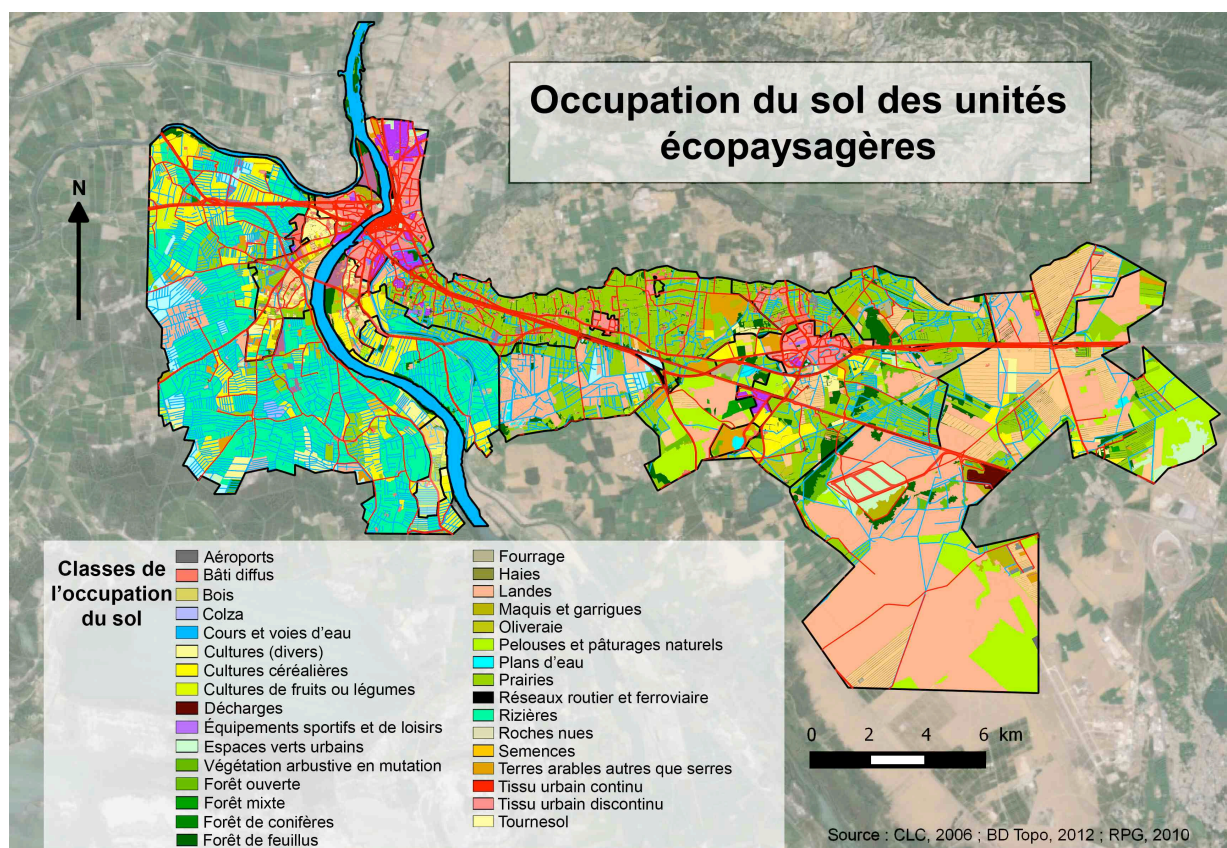
Figure 6 Enrichissement de la base de donnée occupation du sol



hydrographique et les réseaux de transport ont été intégrés à la base de données en fonction de

leur largeur (variable fournie par la BD Topo). Il aurait été possible de définir la largeur en fonction de la densité du trafic ou de la vitesse de circulation qui ont déjà montré leur impact sur la faune dans la littérature [Seiler A., 2005 ; Garcia-Gonzalez C. et al., 2012]. Cependant, il semble plus pertinent de rester sur une entité physique pour homogénéiser l'ensemble des éléments. Puis, les passages à faune, principalement sous forme de buse, identifiés par le CEREMA [CEREMA, ex-CETE Méditerranée, 2013] ont été intégrés de la même manière. Enfin, des données sur le relief auraient pu être rajouté mais le territoire sur lequel porte l'étude est quasiment plan et cela n'aurait présenté aucun intérêt car n'ayant aucun impact sur le déplacement de l'espèce cible. Le résultat montre une certaine hétérogénéité du territoire (Carte 5). On note également une certaine opposition est / ouest. À l'ouest, les unités paysagères de la Camargue, à proximité du Rhône, où le réseau hydrographique est très présent, sont composées de nombreuses parcelles cultivées (avec la riziculture qui domine). Plus à l'est, les paysages sont plus secs (le réseau hydrographique moins important) et les cultures moins présentes : le paysage se compose essentiellement de prairies, landes et pelouses à l'image de la Crau. Par ailleurs, au nord du fuseau, les paysages semblent plus complexes et plus fragmentés par le réseau de transports par rapport au sud où les parcelles paraissent plus grandes et le réseau de transports moins dense.

Carte 5 Occupation du sol du terrain d'étude



Enfin, les unités écopaysagères prennent tout leurs sens lorsque l'on observe leur composition en termes d'occupation du sol avec des spécificités qui leur sont propres. Sur chaque unité la surface de chaque type d'occupation du sol est calculée puis rapportée à la surface de l'unité. Rajouter à cela la surface de chaque parcelle, il est possible d'analyser leurs structures et leurs caractéristiques. Le Tableau 4 résume ces analyses. Notre terrain d'étude est donc nettement dominé par les espaces agricoles mais la taille des parcelles ainsi que leur composition varient d'une unité à une autre.

Tableau 4 Occupation du sol des unités écopaysagères (Source : CLC, 2006 ; BD Topo, 2012 ; RPG, 2010)

Unité paysagère	Description
Arles	Zone urbaine
Azegat	Agricole. Cultures variées, surtout céréalières, sur parcelles de tailles moyennes
Bocage de Gimeaux	Agricole. Cultures variées (riz, céréales, fruits, légumes, etc.)
Bon accueil	Zone résidentiel périurbaine
Camargue cultivée	Agricole. Dominé par de grandes parcelles : les rizières au sud, plus variés au Nord
Crau d'Arles	Agricole. Dominé par les prairies
Entre Crau sèche et Crau humide	Agricole. Largement dominé par les prairies, pelouses et pâturages mais avec également de nombreuses cultures (vergers, céréales, etc.)
Grand Plan du Bourg	Agricole. Dominé par les rizières et les céréales
Iles sables	Agricole. Dominé par les vignobles.
Le Coussoul	Agricole. Dominé par les pelouses et pâturage
Le Rhône	Fleuve
Marais de Meyranne et de Chanoine	Agricole. Dominé par les zones humides et plus secondairement les prairies
Mitage résidentiel de Saint-Martin-de-Crau	Zone résidentielle périurbaine avec une forte présence de prairies
Petit Plan du Bourg	Agricole. Cultures variées, dominé par les céréales. Forte pression anthropique d'Arles au Nord avec les habitats pavillonnaires et les zones d'activités
Raphèle	Zone urbaine
Saint-Martin-de-Crau	Zone urbaine
Trinquetaille	Zone d'habitats diffus qui subit la pression anthropique d'Arles
Zone d'activité	Zone industrielle et commerciale avec quelques pelouses et pâturages

Ainsi, le croisement de différentes bases de données permet de définir de manière précise le terrain d'étude en tenant compte de certains éléments primordiaux pour la pipistrelle. Les spécificités du territoire et de chaque unité paysagère sont identifiées. Une classification en fonction des fonctionnalités de ces entités pour la pipistrelle permettra de comprendre ce qui est favorable ou non pour cette espèce cible.

2.3.2 *Cartographie du paysage de l'espèce cible pour les graphes paysagers*

Les données utilisées précédemment ont permis d'identifier la nature de l'occupation du sol de notre terrain d'étude. A l'aide de cela, il est possible de définir le paysage de la pipistrelle c'est à dire d'identifier les différents milieux tels qu'elle les perçoit.

2.3.2.1 Cartographie des fonctionnalités du paysage

A travers différentes sources d'informations [Arthur L. & Lemaire M., 1999 ; <http://www.corif.net> ; <http://www.onf.fr> ; <http://www.lpo.fr>] et comme vu précédemment (introduction du chapitre 2.3), il est possible de définir l'espace selon cinq classes (Tableau 5).

On obtient donc :

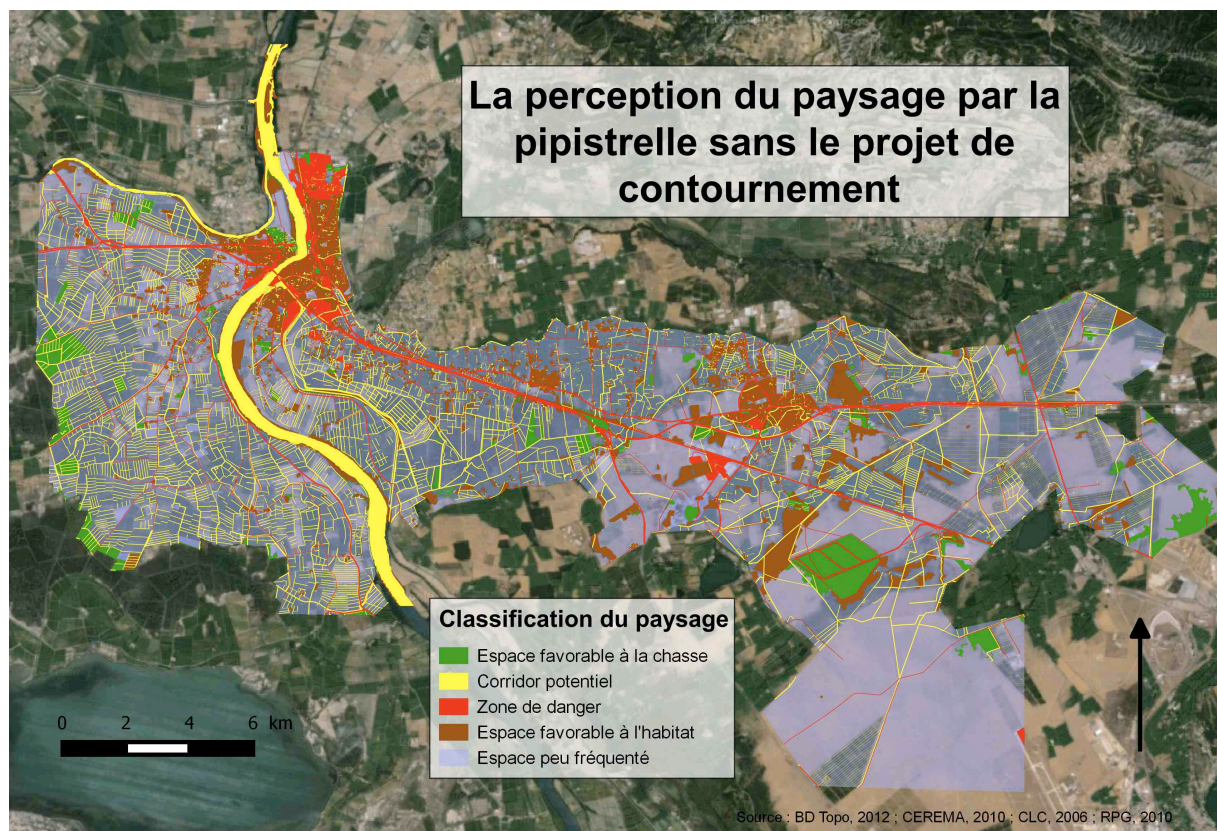
- les gîtes favorables pour le repos et la reproduction de l'espèce
- les espaces de chasse qui permettent à l'espèce de boire et de se nourrir
- les corridors qui permettent à l'espèce de se déplacer de manière optimale
- les zones de danger qui agissent comme une limite dans les déplacements des chiroptères et pouvant causer leur mort
- les espaces peu fréquentés sont nombreux mais n'ont aucune fonction ou ne permettent pas le déplacement de notre espèce cible.

Tableau 5 Classification de l'occupation du sol

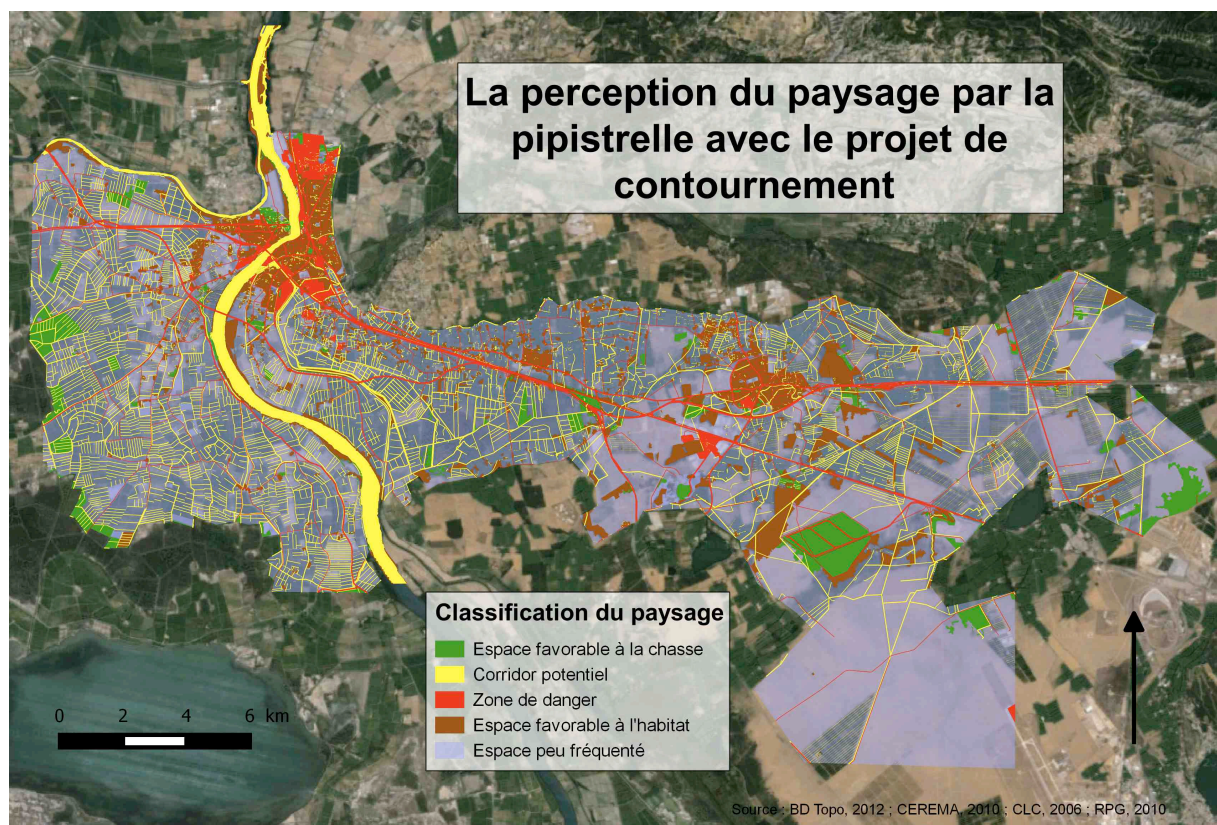
Occupation du sol	Fonctionnalité du paysage pour l'espèce cible
Aéroport	Zone de danger
Bâti diffus	Habitat favorable
Bois	Habitat favorable
Colza	Espace peu fréquenté
Cours et voie d'eau	Corridor
Culture (divers)	Espace peu fréquenté
Culture céréalière	Espace peu fréquenté
Culture de fruits et légumes	Espace peu fréquenté
Décharge	Zone de danger
Équipement sportif et de loisir	Zone de danger
Espace vert urbain	Espace favorable à la chasse
Forêt et végétation arbustive en mutation	Espace favorable à la chasse
Forêt ouverte	Espace favorable à la chasse
Forêt mixte	Habitat favorable
Forêt de conifères	Habitat favorable
Forêt de feuillus	Habitat favorable
Fourrage	Espace peu fréquenté
Haie	Corridor
Lande	Espace peu fréquenté
Maquis et garrigue	Espace favorable à la chasse
Passage à faune	Corridor
Oliveraie	Espace peu fréquenté
Pelouse et pâturage naturel	Espace peu fréquenté
Plan d'eau	Espace favorable à la chasse
Prairies	Espace peu fréquenté
Réseau routier	Zone de danger
Réseau ferroviaire	Zone de danger
Rizière	Espace peu fréquenté
Roche nue	Espace peu fréquenté
Semence	Espace peu fréquenté
Terre arable autre que serres	Espace peu fréquenté
Tissu urbain continu	Habitat favorable
Tissu urbain discontinu	Habitat favorable
Tournesol	Espace peu fréquenté

La classification de la perception du paysage par l'espèce peut être cartographiée avant (Carte 6) et après (Carte 7) le projet de contournement d'Arles.

Carte 6 La perception du paysage de la pipistrelle avant le projet de contournement d'Arles



Carte 7 La perception du paysage de la pipistrelle après le projet de contournement d'Arles



Les espaces favorables à l'habitat de l'espèce se placent essentiellement au cœur d'Arles et de Saint-Martin-de-Crau et se superposent avec des espaces qui constituent un danger pour elles, soit principalement les réseaux de transports. Ce fait n'est pas étonnant pour les pipistrelles qui se sont très bien accommodées de la présence de l'homme [Arthur L. & Lemaire M., 1999 ; Schober W. & Grimmberger E., 1991]. De plus, on distingue de nombreux habitats de petite taille sur l'ensemble du terrain d'étude, en périphérie des villes. Ils correspondent certainement aux mas répartis de manière hétérogène et très présents en Camargue et sur certaines entités de la Crau, comme la Crau d'Arles. Par ailleurs, les espaces favorables exclusivement à leur activité de chasse sont surtout présents en dehors des espaces anthropisés car correspondant à des espaces plus naturels comme des forêts ou des plans d'eau. Enfin, le Rhône se place comme un important corridor de par son importance physique pouvant se placer comme un corridor journalier d'une part et destiné aux migrations hivernales d'autre part.

Ainsi, à partir de ce premier résultat, de nombreuses observations permettent de distinguer l'hétérogénéité du paysage et l'importance des activités anthropiques. En effet, certaines infrastructures sont parfois utilisées comme des habitats potentiels par la pipistrelle et, paradoxalement, peuvent être une menace pour elle. En réalité cette étape de notre recherche a permis une première approche du paysage mais n'a pas été retenue pour définir le paysage de l'espèce. Pour la mise en place du modèle des graphes paysagers, la cartographie retenue doit se baser sur la perméabilité du paysage pour l'espèce.

2.3.2.1 Cartographie de la résistance du paysage pour la pipistrelle

La cartographie des classes paysagères permet d'identifier les fonctions du paysage pour l'espèce cible. Cependant, elle ne permet pas de le définir en termes de rugosité, de perméabilité, de résistance. Cette méthode viserait, par la suite, à attribuer un poids à chaque élément du paysage en tenant compte de la capacité pour l'espèce de le traverser. La cartographie du paysage qui sera utilisée pour le modèle des graphes paysagers doit donc montrer un gradient de la résistance du paysage. Pour cela, au delà des classes faites précédemment (Tableau 5), il apparaît important de différencier les infrastructures de transport selon leur type. Certaines peuvent être totalement imperméables comme les autoroutes alors que d'autres ont un impact très limité sur les pipistrelles, c'est le cas notamment des chemins. Pour cela, la BD Topo caractérise chaque infrastructure selon sa vocation (autoroute, liaison

régionale, liaison principale, liaison locale, voie ferrée) et nous permettra de les pondérer de manière différente (Tableau 6).

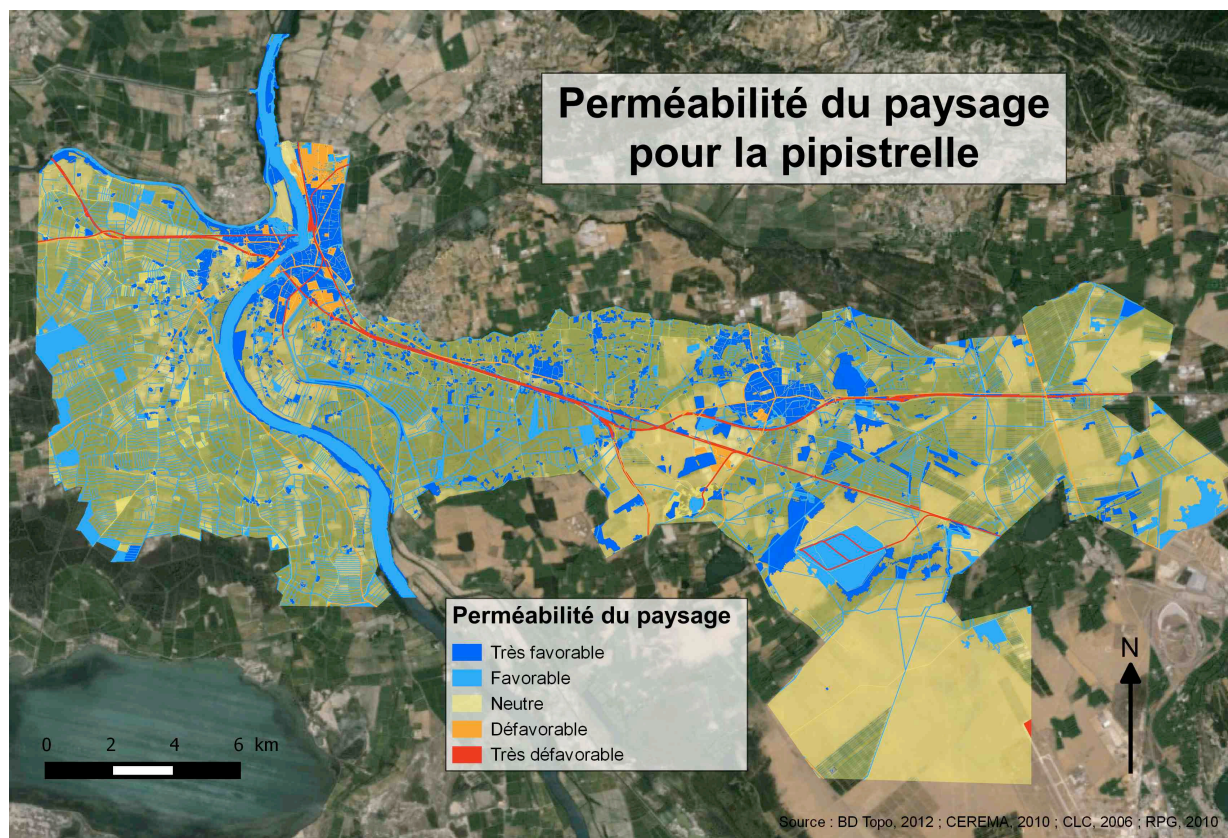
Tableau 6 Classification du paysage tenant compte des vocations des réseaux de transports

Classe paysagère	Type de milieu
Habitat	Très favorable
Corridor et espace de chasse	Favorable
Espace peu fréquenté et liaison locale	Neutre
Route principale et régionale, décharge, équipement sportifs et de loisirs	Défavorable
Autoroute et voie ferrée, aéroport	Très défavorable

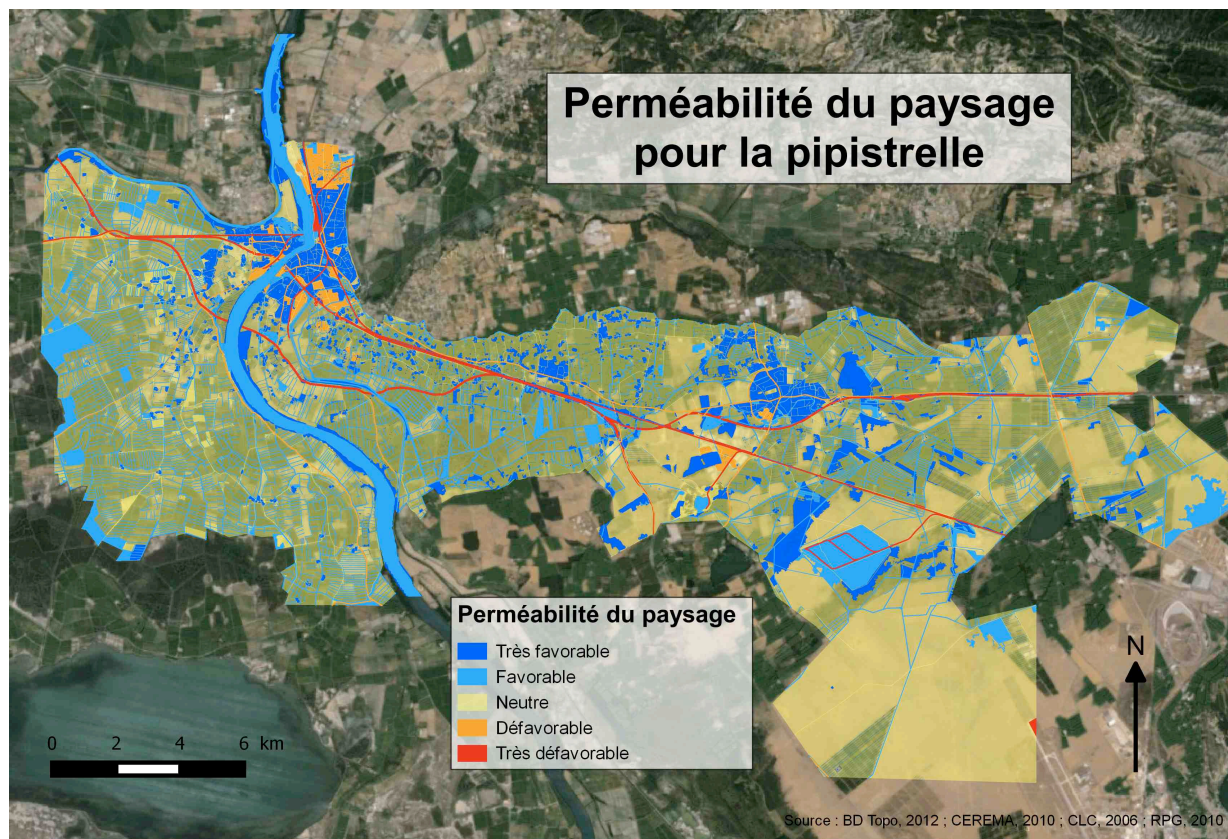
Dans le Tableau 5, toutes les routes avaient le même poids ce qui aurait pu conduire à de fausses conclusions. En effet, certaines routes n'ont aucun effet sur les pipistrelles : elles ne sont ni bénéfiques ni néfastes. Pour certaines espèces, des chemins peuvent même jouer le rôle de corridor. C'est donc pour cela, que cette distinction était nécessaire. À partir de la cartographie de perméabilité du paysage pour la pipistrelle (Carte 8 et Carte 9), on note que les centre villes d'Arles et de Saint-Martin-de-Crau ne sont pas aussi défavorables que ce que les précédentes cartographies auraient pu nous laisser penser. En réalité, il semble que seules les grandes infrastructures de transports (autoroutes, voies express, voies ferrées) jouent un rôle de barrière quasi infranchissable. Enfin, notons que les ponts au dessus des cours d'eau ont été localisés par le CEREMA sur la RN 113 et l'A54 lors d'une enquête de terrain [CEREMA, 2012]. Les portions de routes concernées ne sont donc pas matérialisées sur la cartographie de la perméabilité car les pipistrelles les évitent facilement en passant en dessous.

Ainsi, le but sera de mesurer la connectivité des habitats et les échanges potentiellement amputés par les différentes infrastructures de transport. Il sera possible d'analyser la transparence écologique de ces aménagements. Pour réaliser cette opération, la prochaine étape consistera à la mise en place des graphes paysagers.

Carte 8 La perméabilité du paysage pour la pipistrelle avant le projet de contournement d'Arles



Carte 9 La perméabilité de paysage pour la pipistrelle après le projet de contournement d'Arles



2.4 Mise en place des graphes paysagers pour l'espèce cible

Les problématiques liées à la modification du paysage et à la diminution de la biodiversité ont fait émerger le concept de réseau écologique. Les graphes paysagers sont apparus récemment comme des méthodes de modélisation efficace [Foltête J.-C. et al., 2012]. De nombreux outils se sont développés afin d'appréhender les graphes paysagers, avec notamment ArcGIS, Guidos, PathMatrix, COnefor Sensinode, JMatrixNet, mais tous présentent de nombreuses limites en termes de fonctionnalités et d'intuitivité. C'est donc à l'aide du logiciel Graphab 1.2⁴, développé par le laboratoire Théma [Foltête J.-C. et al., 2012], et à travers la cartographie de perméabilité pour la pipistrelle réalisée précédemment, que les réseaux écologiques seront modélisés. Dans un premier temps, il s'agira de créer les graphes à partir de la carte des paysages en identifiant les tâches d'habitats et les liens. Dans un second temps, des métriques de connectivité seront calculées et permettront d'analyser la transparence écologique des infrastructures de transport.

Les graphes paysagers appliquent les principes de la théorie des graphes en écologie du paysage. Au sens large, les graphes se composent de sommets et d'arêtes [Beauguitte L., 2010 ; Fournier J.-C., 2006]. Dans notre cas, nous parleront de nœuds, représentant les tâches d'habitats optimales pour l'espèce, et de liens, soit un espace entre deux tâches d'habitats que l'espèce est susceptible de pouvoir traverser [Foltête J.C. et al., 2012 ; Minor E.S. et Urban D.L., 2007]. La modélisation des réseaux écologiques et de la connectivité passe donc par trois étapes qu'il s'agira de définir :

- la définition des nœuds
- la définition des liens
- la finalisation du graphe

⁴ « Le programme GRAPHAB est un outil de modélisation des réseaux écologiques par les graphes paysagers. C'est un outil intégré composé de 4 modules :

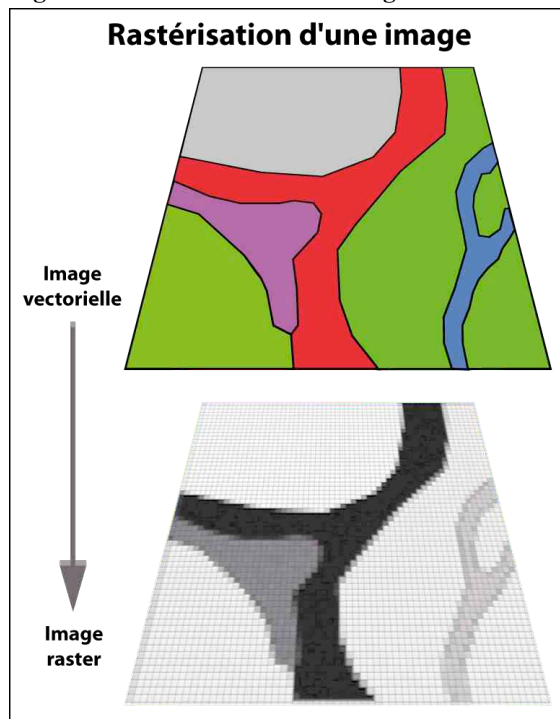
- création de graphes à partir d'une carte de paysage avec identification des tâches d'habitat et des liens
- calcul d'un grand nombre de métriques de connectivité
- modèle de distribution
- interface de géo-visualisation »

[<http://thema.univ-fcomte.fr/productions/graphab/fr-home.html>]

2.4.1 Étape préliminaire

Avant, de construire les graphes paysagers, les images vectorielles doivent être converties en images rasters : « *rastérisation* » (Figure 7). À l'aide de QGIS et de son outil « *Rastérisation* », la cartographie du paysage n'est plus composée de différents polygones mais de pixels, d'une résolution spatiale de 10 mètres. Cette valeur a été choisie de manière arbitraire et par rapport à des études, réalisées à des échelles sensiblement identiques, qui avaient montré leur efficacité [Minor E.S. et Urban D.L., 2007 ; Saura S. et Pascual-Horta L., 2007 ; Tournant P., 2014]. Elle permette une analyse à une échelle relativement fine tout en limitant les temps de calcul lors de la création des graphes mais également lors du calcul des différentes métriques. Enfin, lors de ce traitement, chaque pixel est classifié selon sa classe paysagère (Tableau 6, chapitre 2.3.1). On obtient donc une image au format TIF en nuance de gris et dont les valeurs permettront de mettre en place le modèle final.

Figure 7 Rastérisation d'une image vectorielle



2.4.2 Définition des nœuds

Dans un graphe paysager, les nœuds représentent les tâches d'habitat optimal, définis lors de l'étape de cartographie. De manière simple, les tâches peuvent se rapporter aux agrégats de pixels adjacents de la classe habitat. Cependant, selon les espèces, cette définition peut être plus complexe.

Tout d'abord, certaines espèces n'assurent leurs fonctions vitales qu'à une certaine distance de la partie considérée comme le cœur des entités spatiales. Une zone tampon est donc susceptible d'être perturbée et d'impacter l'espèce. Un traitement morphologique de la cartographie du paysage permet de distinguer les pixels correspondants aux cœurs d'habitats et de ne retenir,

pour l'analyse, que ces espaces comme tâches d'habitats [Soille P. et Vogt P., 2009 ; Vogt P. et al., 2007].

Ensuite, d'autres espèces n'ont pas d'entités spatiales simples pour identifier ce qui pourrait correspondre à une tâche d'habitat. Leurs besoins (reproduction, alimentation, repos, hivernage, etc.) peuvent être dissociés dans l'espace ce qui nécessite une définition plus complexe notamment sous la forme d'entités composites. C'est le cas, par exemple, de la plupart des chiroptères où le gîte et le terrain de chasse sont séparés. Certaines études identifient donc la proximité de ces deux espaces comme une tâche d'habitats.

Au premier abord il apparaît judicieux d'appliquer cette dernière méthodologie à notre espèce cible car elle correspond exactement à ce cas de figure. Néanmoins, les pipistrelles se sont très bien adaptées à l'homme [Arthur L. et Lemaire M., 1999 ; Schober W. et Grimmberger E., 1991] et retrouvent des lieux de chasse partout autour de leur gîte potentiel. En ville, les parcs publics leur permettent de se nourrir mais également les lampadaires qui attirent beaucoup d'insectes. Les espaces agricoles leurs offrent également tout ce dont elles ont besoin avec le réseau hydrographique pour boire et chasser, ainsi que les nombreux insectes à proximité des cultures pour se nourrir. Les espaces plus naturels, notamment les forêts, sont également très favorables à la chasse. Ainsi, tous les espaces qui avaient été identifiés comme habitat dans la cartographie du paysage correspondront à une tâche d'habitat (chapitre 2.3). Enfin, les tâches d'habitat doivent être associée à un indicateur de potentiel démographique, par défaut et ce qui sera appliqué ici, la surface de la tâche est identifiée comme proportionnelle à la quantité de ressource. À partir de là, Graphab permet de sélectionner les habitats à l'aide d'un seuil de taille qui définiront les tâches pour le modèle des graphes paysagers. Or, les pipistrelles peuvent vivre dans une simple fissure d'arbre, de petits espaces à l'échelle du paysage. Toutes seront donc prises en compte.

Ainsi, les nœuds sont le résultat des modes de vie et des préférences de l'espèce aussi bien sous forme d'entités spatiales que d'indicateurs [Foltête J.-C et al., 2012]. Afin d'établir les connexions potentielles entre chacun d'entre eux, il s'agira de définir les liens.

2.4.3 Définition des liens

On appelle lien un espace qui sépare deux tâches et dont on suppose que les individus peuvent le traverser (coût inférieur à un seuil). La définition de ces liens nécessite trois grands choix :

- leur direction
- leur topologie
- leur pondération.

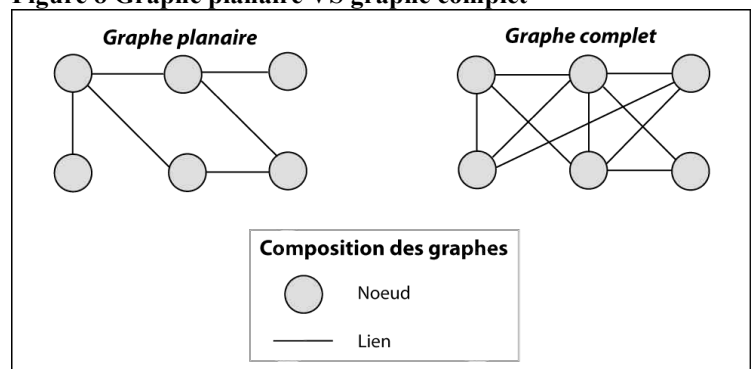
La direction renvoie à choisir entre des liens directifs ou non-directifs. En théorie, il semble plus pertinent d'utiliser des liens directifs soit un apport dissymétrique entre deux tâches [Foltête J.-C. et al., 2012]. On pourrait partir, par exemple, de l'hypothèse qu'une tâche plus importante est plus émettrice qu'une tâche de taille inférieure. Néanmoins pour des raisons pratiques, notamment liés aux limites de Graphab et à certaines contraintes informatiques (temps de calcul, etc.), notre graphe paysager sera construit avec des liens non-directifs et symétriques. On émet donc l'hypothèse que la capacité de dispersion des individus est identique d'une tâche à une autre et ne dépend donc pas de leurs tailles.

Ensuite, la mise en place des liens implique la définition de leur topologie avec deux grandes possibilités (Figure 8) :

- tous les liens sont potentiellement pris en compte (graphe complet)
- seuls les liens formant un graphe planaire minimal sont pris en compte [Fall A. et al., 2007].

Dans le premier cas (Figure 8, droite) les liens peuvent se superposer, ce qui n'est pas le cas du graphe planaire (Figure 8, gauche) qui se place comme une approximation et une simplification du graphe complet [Galpern et al., 2011]. Il n'existe pas de comparaison formelle entre ces deux options qui dépendent des métriques de connectivité considérées et de la prise en compte de la distance à l'intérieur de la

Figure 8 Graphe planaire VS graphe complet



tâche [Foltête J.-C. et al., 2012]. Pour cette raison ainsi que pour accélérer les temps de calcul, le graphe planaire sera utilisé. Par ailleurs, Graphab 1.2 permet de mettre en place le graphe en tenant compte de la distance intra tâche. Pour certaines espèces, cela n'est pas forcément utile. Dans notre cas, on sait que les pipistrelles sont fidèles à leur gîte qui correspondent à de petits espaces, et que celles-ci peuvent aller chasser au-delà de cet espace. Il est donc important de tenir compte de la distance intra tâche.

Enfin, la pondération des liens consiste à attribuer une valeur de résistance. Elle peut être binaire mais, le plus souvent, elle se caractérise par le coût de déplacement entre deux tâches. Cela soulève donc l'importance de la cartographie du paysage ou plus exactement de la matrice paysagère. Ce coût de déplacement est quantifié par une métrique spatiale qui est soit la distance euclidienne (ou à vol d'oiseau) soit la distance de moindre coût. Dans le premier cas, on suppose que la matrice est uniforme et on ne tient donc pas compte des caractéristiques de résistance du paysage pour l'espèce cible ; seul le coût en termes de distance est retenu. A l'inverse, les distances de moindre coût permettent de tenir compte de l'hétérogénéité de la matrice en attribuant à chaque classe paysagère une valeur de résistance. Cette méthode permet de considérer non seulement la distance mais également les caractéristiques du paysage. Aucune étude ne permet de définir réellement le poids des infrastructures : cela dépend de l'espèce étudiée, du terrain d'étude et du choix du scientifique lui-même [Foltête J.-C. et al., 2011 ; Foltête J.-C. et al., 2012 ; Tournant P., 2014]. De ce fait, ils seront déterminés de manière arbitraire à l'aide des connaissances sur l'espèce cible. Plusieurs poids pourront être testés afin d'analyser les variations du modèle. Dans tous les cas, les paramètres sont déterminés pour un modèle initial (Tableau 7).

Tableau 7 Classes paysagères et résistances associées pour la pipistrelle

Occupation du sol	Fonctionnalité du paysage pour l'espèce cible	Résistance
Aéroport	Zone de danger	50
Bâti diffus	Habitat favorable	10
Bois	Habitat favorable	10
Colza	Espace peu fréquenté	20
Cours et voie d'eau	Corridor	10
Culture (divers)	Espace peu fréquenté	20
Culture céréalière	Espace peu fréquenté	20
Culture de fruits et légumes	Espace peu fréquenté	20
Décharge	Zone de danger	50
Équipement sportif et de loisir	Zone de danger	50
Espace vert urbain	Espace favorable à la chasse	10
Forêt et végétation arbustive en mutation	Espace favorable à la chasse	10
Forêt ouverte	Espace favorable à la chasse	10
Forêt mixte	Habitat favorable	10
Forêt de conifères	Habitat favorable	10
Forêt de feuillus	Habitat favorable	10
Fourrage	Espace peu fréquenté	20
Haie	Corridor	10
Lande	Espace peu fréquenté	20
Maquis et garrigue	Espace favorable à la chasse	10
Passage à faune	Corridor	10
Oliveraie	Espace peu fréquenté	20
Pelouse et pâturage naturel	Espace peu fréquenté	20
Plan d'eau	Espace favorable à la chasse	10
Prairies	Espace peu fréquenté	20
Réseau routier (route locale)	Zone de danger	20
Réseau routier (route principale)	Zone de danger	50
Réseau routier (route régionale)	Zone de danger	50
Réseau routier (autoroutes)	Zone de danger	100
Réseau ferroviaire	Zone de danger	100
Rizière	Espace peu fréquenté	20
Roche nue	Espace peu fréquenté	20
Semence	Espace peu fréquenté	20
Terre arable autre que serres	Espace peu fréquenté	20
Tissu urbain continu	Habitat favorable	10
Tissu urbain discontinu	Habitat favorable	10
Tournesol	Espace peu fréquenté	20

Cette pondération permet de mettre en avant l'importance des routes et plus particulièrement des grandes infrastructures routières que sont les autoroutes et les voies ferrées. On part donc de l'hypothèse que ces infrastructures de transport sont les principaux facteurs de réduction de

la connectivité des habitats. Cela permettra de mettre en évidence les zones les plus transparentes d'un point de vue écologique et d'identifier celles où il peut être pertinent de restaurer une continuité écologique. En ce qui concerne les routes à vocation principale et régionale, il a été supposé qu'elles jouaient moins un rôle de barrière que les grandes infrastructures de transport mais étaient à prendre en considération de par leur largeur et leur densité de trafic. Enfin les liaisons locales et les espaces peu fréquentés ont le même poids car la faible densité de circulation sur ces routes ainsi que la faible limitation de vitesse et la faible largeur les rendent peu fréquentées par les pipistrelles mais également peu dangereuses pour elles par rapport aux autres infrastructures de transports.

Ainsi, on retiendra que, dans notre modèle, les liens sont non directifs, définis sur un graphe planaire et calculés à travers la distance des moindres coûts prenant en compte ainsi les caractéristiques du paysage. Certains paramètres permettront de finaliser le modèle. Il sera ainsi possible de calculer différentes métriques de connectivité.

2.4.4 Finalisation du graphe

Les liens et les nœuds du modèle de graphes paysagers ayant été définis, il ne reste qu'à finaliser la mise en place du modèle.

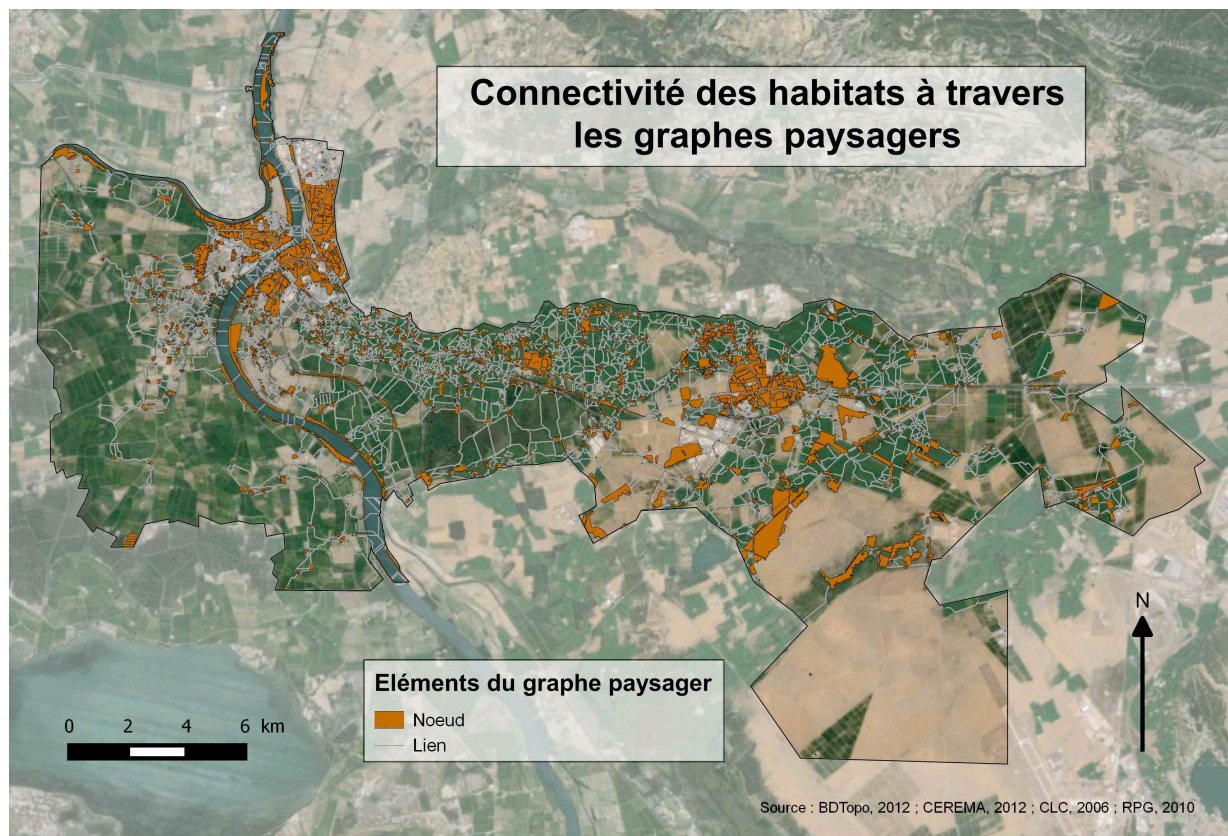
Cette étape consiste à choisir les liens valides, c'est-à-dire identifiés comme des passages possibles pour l'espèce. Généralement, cela consiste à choisir un seuil qui représente la distance de dispersion maximale de l'espèce. Celle-ci s'exprime dans la même unité que celle utilisée soit en mètre pour la distance euclidienne et en coût cumulé dans le cas des distances de moindre coût. Cette opération est donc un simple seuillage des poids des liens. A partir, d'un même jeu de liens, il est possible de faire varier ce seuil et d'obtenir plusieurs graphes.

Dans notre cas, nous utiliserons un « *graphe seuillé* » à 2 000 m. Cette valeur correspond à la distance maximale de déplacement d'une pipistrelle par nuit, lors de la chasse. Durant des périodes de migration hivernale ou estivale, les distances parcourues sont beaucoup plus importantes et les axes migratoires sont nombreux, avec un déplacement record de 1905 km (déplacement entre la Lettonie et la Croatie). Cependant, il n'est pas pertinent d'analyser la connectivité du paysage à travers ces migrations car elles restent ponctuelles et ne correspondent pas aux périodes d'échanges entre habitats ni aux périodes de reproduction. Par ailleurs, il faut savoir que pour le calcul de certaines métriques, un « *graphe non seuillé* » suffit

car les seuils n'ont aucun effet. C'est notamment le cas pour le potentiel démographique qui ne dépend pas des liens mais uniquement des nœuds.

Le graphe est donc seuillé afin de s'approcher au maximum de la réalité et d'éliminer tous liens aberrants. Cette étape soulève également l'importance du seuil utilisé et des caractéristiques biologiques et comportementales de l'espèce. Le résultat final est représenté sur la Carte 10.

Carte 10 Connectivité des habitats à travers les graphes paysagers



La majorité des habitats du paysage sont connectés d'après notre modèle, ce qui semble soulever une certaine cohésion des unités paysagères entre elles et à l'intérieur de chacune d'elles. On note cependant quelques exceptions. Le Coussoul est peu favorable à la présence et aux déplacements des pipistrelles, notamment au sud et à l'est de cette unité. Ceci s'explique certainement par les larges espaces secs et ouverts qui le composent. Ce phénomène est également observable pour la Camargue cultivée qui présente également de grands paysages ouverts.

Ainsi, à partir de nombreuses données, on a pu mettre en évidence différents enjeux sur les plans paysagers, environnementaux et liés à la biodiversité et à l'habitat. Sur l'ensemble du fuseau d'étude, les habitats de type prairiaux sont les plus représentés [BIOTOPE, 2012] mais on note également l'importance des zones humides sur le territoire camarguais. Ces espaces sont favorables à la présence d'une très riche biodiversité qui est de plus très variée. Les chiroptères (ou chauve-souris dans le langage commun), espèce protégée au niveau national et européen, trouvent des espaces pour leurs gîtes ainsi que pour la chasse grâce à l'hétérogénéité de ces paysages. Plus particulièrement, la pipistrelle figure sur les listes rouges européenne et mondiale de l'UICN (2014) ainsi que sur la liste rouge des mammifères continentaux de France métropolitaine (2009). Sur notre territoire, c'est l'espèce (parmi les chiroptères) la plus concernée de par son abondance et de par la menace que représentent les activités humaines pour elle. Paradoxalement, elle s'est très bien adaptée à la présence de l'homme et de ses infrastructures qui lui servent parfois de gîte. Malgré cela, les infrastructures de transport sont une limite pour les déplacements des pipistrelles qui représentent l'espèce la plus touchée par les collisions routières sur notre terrain d'étude [CEREMA, 2012]. C'est donc à travers ces constats et une analyse plus approfondie de l'espèce qu'un modèle de graphes paysagers a été mis en place dans le but d'analyser la connectivité des habitats. À l'aide de différentes sources de données d'occupation du sol pour la définition du paysage et de la littérature pour appréhender les comportements de l'espèce cible, le modèle a été paramétré afin de représenter la réalité de la manière la plus précise. Désormais, Graphab 1.2 permettra de calculer différentes métriques afin d'analyser la connectivité du paysage pour la pipistrelle et par voie de conséquence la transparence écologique des infrastructures de transport concernées.

Enfin, l'usage des Systèmes d'Informations Géographiques en écologie du paysage présente plusieurs limites :

- l'indisponibilité et l'hétérogénéité des bases de données sur de grandes zones d'études (pertinent à l'échelle de la résolution) ;
- l'identification des réseaux écologiques et définition des structures (obstacles,...) varient selon les points de vue. De manière plus générale, la cartographie du paysage dépend de la littérature utilisée et de l'interprétation qu'en fait le scientifique. La part de choix arbitraire est donc importante et peut être un véritable biais ;

- les données utilisées en entrée jouent un rôle majeur dans la mise en place de ce modèle. Ici, les habitats ont été sélectionnés de manière relativement large. Il pourrait donc être pertinent de mieux les cibler. Par exemple, la BD Topo différenciée permettrait de partir de l'hypothèse que seuls certains bâtiments ou encore monuments peuvent abriter un gîte. Cela affinerait ainsi les réservoirs de vie supposés ;
- le logiciel limite les possibilités. En ce qui concerne l'échelle de travail, plus elle est fine plus les temps de calcul sont longs et donc plus le territoire est grand plus l'échelle d'analyse sera large. Lorsque les calculs sont trop longs, il est souvent nécessaire de simplifier le graphe ce qui peut engendrer une perte d'information.

Aujourd'hui, certains scientifiques tendent à utiliser les modèles de simulation multi-agents pour pallier à ces limites [Fourès J.-M., 2014]. Il en résulte donc un modèle dynamique qui prend en compte les caractéristiques de l'espèce cible et du paysage. Il permet également de considérer les ressources vitales, comme la nourriture, mais également, si nécessaire, les caractéristiques des autres espèces qui peuvent jouer un rôle dans la survie de l'espèce cible. Cela est d'autant plus pertinent pour les espèces prédatrices qui dépendent de leur proie et inversement.

Chapitre 3 : Analyser la transparence écologique à travers la connectivité des habitats

Le terrain d'étude présente de nombreux enjeux qui semblent s'opposer et qu'il s'agit de concilier. D'une part, le développement socio-économique à l'échelle locale, nationale et internationale s'est traduit et continue de se traduire par l'accroissement des activités humaines et, plus exactement, des infrastructures de transport⁵. D'autre part, les enjeux liés au développement durable, à la préservation de l'environnement et à la sauvegarde de la biodiversité, préconisent la restauration des réseaux écologiques. Aujourd'hui, faire coexister les réseaux de transports et les réseaux écologiques est l'objectif premier fixé par la Trame Verte et Bleue. C'est donc pour cela que l'analyse de la transparence écologique a montré toute son importance. Sur le terrain d'étude, les chiroptères, et plus précisément les pipistrelles, sont très présentes et sont de plus classées comme espèce protégée. Une méthodologie a donc été précédemment (Chapitre 2 :) élaborée afin d'analyser la connectivité des habitats pour cette espèce, à travers la théorie des graphes. À partir de ce modèle, mis en place avec le logiciel Graphab 1.2, de nombreuses métriques (indicateurs) peuvent être calculées et cartographiées permettant d'analyser la transparence écologique des infrastructures de transport ainsi que les effets du jumelage et du projet de contournement d'Arles. Puis, par voie de conséquence, il sera possible d'identifier les fonctionnalités et services écosystémiques potentiellement amputés. Pour finir, les limites de cette étude seront mises en exergue et les résultats pourront être discutés à travers la littérature.

⁵ Notre étude s'est focalisée sur les réseaux de transport routier et ferré. Cependant, notons que les réseaux électriques et éoliens sont également très impactant.

3.1 Réseaux de transports et réseau écologique : une difficulté à coexister

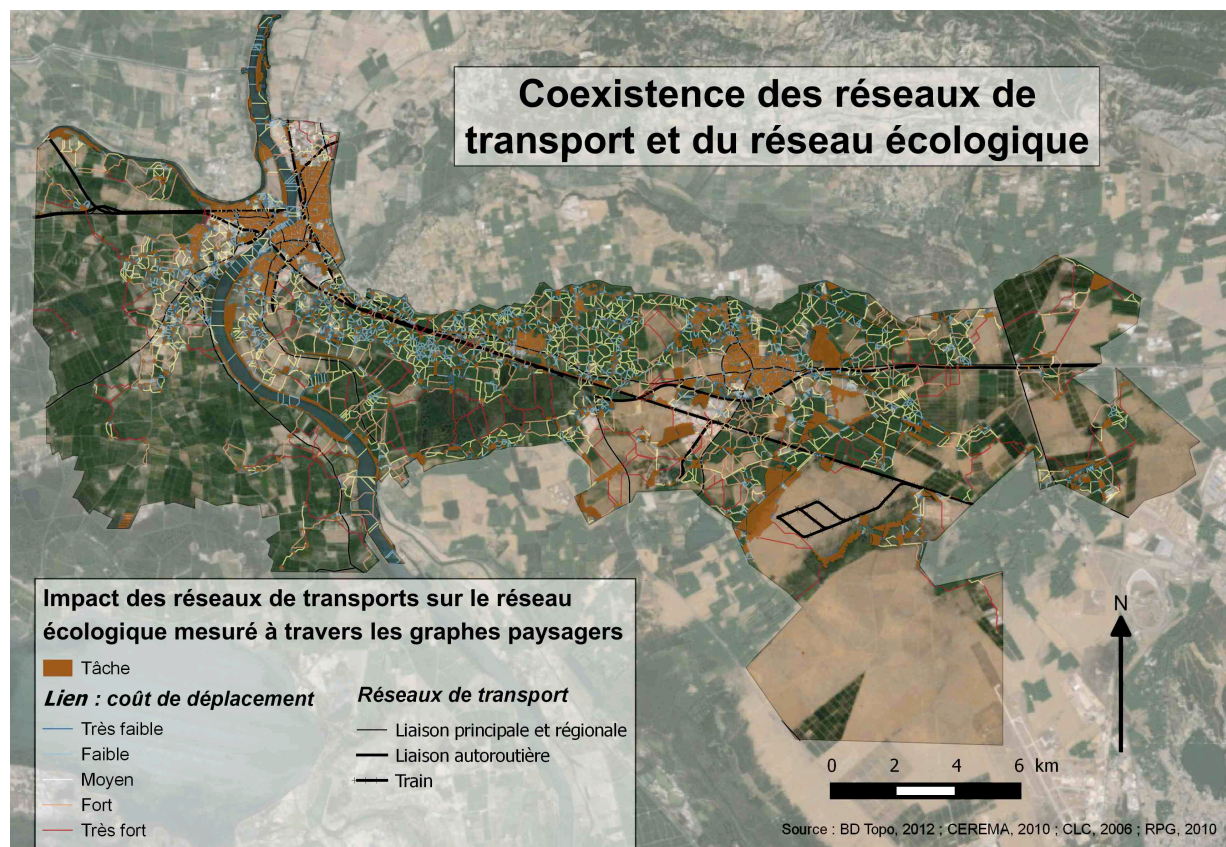
Conserver et restaurer les continuités écologiques est un des objectifs de la Trame Verte et Bleue, et faire coexister les réseaux de transports avec le réseau écologique est aujourd'hui un enjeu majeur en termes de développement durable. Il sera donc primordial d'analyser de quelle manière ces réseaux coexistent sur notre terrain d'étude. Pour cela, le modèle des graphes paysagers, précédemment mis en place (Chapitre 2 :), a permis d'identifier les tâches d'habitats, réservoir de vie pour l'espèce cible (nœuds), et de supposer les différentes connexions potentielles entre deux de ces espaces (liens). Ainsi, il s'agira, dans un premier temps, d'analyser l'état de notre terrain d'étude sur le sujet. Dans un second temps, les fonctionnalités amputées seront identifiées et il sera possible de souligner l'intérêt de rétablir certaines connexions. Enfin, l'utilité d'une approche par l'écologie du paysage sera justifiée.

3.1.1 Distance inter-tâche : première mesure de la connectivité des habitats

Le graphe final (chapitre 2.4.4) avait montré que presque tous les habitats pouvaient être connectés. Cependant, certaines connexions peuvent être plus favorables que d'autres et proximité ne rime pas toujours avec connectivité [Tournant P., 2014]. C'est pour cela qu'une première approche consistera à analyser la distance inter-tâche. Graphab 1.2 permet de mesurer la longueur des liens entre les tâches. Cette variable peut être soit euclidienne, c'est-à-dire à vol d'oiseau, qui ne tient pas compte des spécificités du paysage, soit pondérée par la matrice paysagère. La seconde option correspond au modèle présenté dans le chapitre 2 et sera analysée.

Les liens peuvent être directement extraits en shape grâce à Graphab 1.2 et le calcul de leur distance, pondérée par les éléments paysagers, est directement réalisé. Dans QGIS, il est donc possible de cartographier les liens en fonctions de leur longueur ainsi que les réseaux de transport (Carte 11) afin de voir de quelle manière ils coexistent.

Carte 11 Un réseau écologique largement impacté par les réseaux de transport



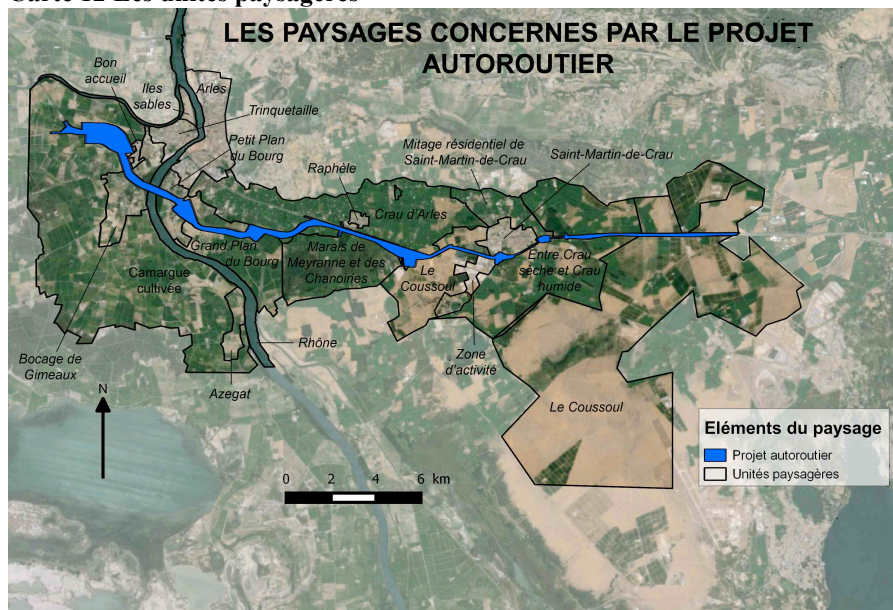
Les liens, seuillés à 2 000 mètres, ont un coût de déplacement moyen (ou une distance pondérée) d'environ 260 mètres et presque la moitié ont une longueur inférieure à 100 mètres. On peut donc supposer de nombreux échanges où les pipistrelles ne doivent parcourir que de courtes distances. Ce phénomène est d'autant plus probable au nord du tracé autoroutier, à l'intérieur de la Crau d'Arles. On note également de faibles distances à l'intérieur du petit Plan de Bourg, au nord du grand Plan de Bourg et des marais de Meyranne et des Chanoines. On peut donc supposer de nombreux échanges entre ces différentes unités paysagères d'une part et entre les différentes villes et villages, le bocage de Gimeaux et l'espace hétérogène de la Crau d'autre part.

Par ailleurs, la RN 113, l'A54 et la voie ferrée, importantes infrastructures de transport en termes de taille, mais également en termes de trafic, même si cette variable n'a pas été prise en compte, semblent créer une rupture entre ces connexions. Malgré la proximité immédiate des

différentes unités paysagères (Carte 12) la traversée est trop « coûteuse »⁶ et donc trop dangereuse. Ces

caractéristiques sont très marquées entre la Crau d'Arles d'un côté et le Grand Plan de Bourg et les Marais de Chanoines et Meyranne de l'autre. Cependant, certains passages à faune avaient été matérialisés et montrent leur

Carte 12 Les unités paysagères



importance. C'est le cas notamment au niveau de l'échangeur à l'ouest de Saint-Martin-de-Crau. L'idéal serait donc peut-être d'en aménager des nouveaux afin de favoriser une plus grande transparence de ces infrastructures de transport.

Enfin, on distingue l'importance du Rhône qui se place comme un véritable corridor mais également comme un réservoir de vie avec sa ripisylve. Il est donc possible de supposer des échanges entre le bocage de Gimeaux, Bon accueil et îles sables avec l'autre rive du Rhône et notamment le Petit Plan de Bourg. Ce phénomène pourrait également s'observer entre les deux parties de la ville d'Arles situées de part et d'autre du fleuve. Par ailleurs, un modèle à échelle plus large et tenant compte des migrations estivales et hivernales aurait pu confirmer ou infirmer les échanges avec les Alpilles à travers le Rhône. Dans tous les cas, il est essentiel de préserver le Rhône et sa ripisylve car assurant de nombreuses fonctionnalités.

Ainsi, paradoxalement, les espaces où les zones de danger sont importantes sont ceux où les habitats semblent les plus connectés. Ce sont également des espaces où rétablir des connexions est un véritable enjeu pour la biodiversité. Ce modèle montre la coexistence des pipistrelles

⁶ Le terme « coûteuse » signifie que le coût de déplacement, c'est-à-dire la distance pondérée par les classes paysagères, est important.

avec l'Homme mais il souligne également certains impacts de la fragmentation sur les habitats de cette espèce et donc l'importance du paysage. Les grandes infrastructures de transport que sont les autoroutes, routes express et voies ferrées, marquent le paysage au détriment de la biodiversité. Une certaine continuité écologique doit donc être restaurée pour faire coexister ces deux réseaux.

3.1.2 Importance de la prise en compte du paysage dans le modèle

Dans la partie précédente, une approche de la connectivité par la distance inter-tâche a permis d'observer l'impact des infrastructures routières. Pour cela, le modèle mis en place a utilisé une matrice paysagère qui a affecté un poids différent à chaque classe paysagère. Il s'agira donc de comprendre l'importance du paysage dans la connectivité des habitats.

Le graphe peut être mis en place à partir de la distance euclidienne, ou à vol d'oiseau. Cette modélisation est donc la même que celle évoquée précédemment mais les calculs ne tiennent pas compte des caractéristiques du paysage et donc de la pondération qui avait été mise en place. L'intérêt est de comparer les deux résultats afin de mieux comprendre le rôle du paysage. De cette manière, on calcule un taux de variation entre la distance de moindre coût et la distance euclidienne (uniquement sur les liens existants dans les deux modèles, les autres étant considérés comme nouveaux, et se plaçant comme un apport d'un modèle à l'autre) de la manière suivante :

$$p = \frac{D_i - D_j}{D_j} \times 100$$

avec p le taux de variation

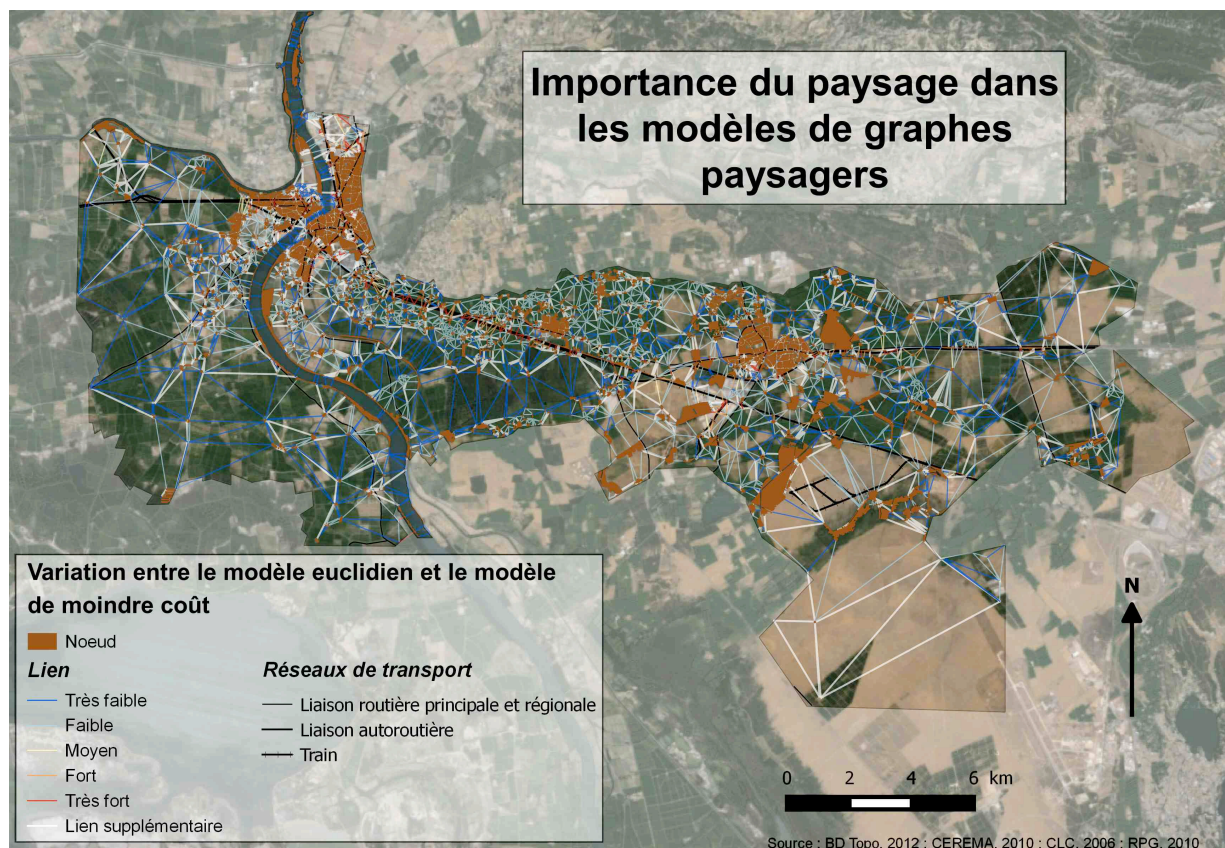
D_i la distance en coût de déplacement

D_j la distance euclidienne

On remarque que tous les liens subissent une variation. Cela s'explique par le fait que la plus basse valeur de la classe paysagère est de 10 alors que les tâches peuvent être quasiment collées ou séparées de quelques mètres voir moins d'un mètre (séparées par un petit chemin par exemple). Sur ces petites distances, on pourrait supposer que le modèle de moindre coût s'écarte de la réalité. Pourtant, les deux modèles sont très proches avec un coefficient de corrélation de Pearson de 0,95 (table : Annexe 6). Cela ne signifie pas pour autant que le

modèle de moindre coût mis en place n'a aucun intérêt mais que certains éléments du paysage ont plus d'impact que d'autres sur la connectivité du paysage pour la pipistrelle (Carte 13).

Carte 13 Importance du paysage dans les modèles de graphes paysagers



Le taux de variation moyen est de 50% et les liens les plus impactés sont ceux qui traversent les infrastructures routières : les classes paysagères les plus coûteuses. Enfin, le modèle euclidien présente 1585 liens de plus que le modèle de moindre coût. Ils se répartissent sur l'ensemble du terrain d'étude et démontrent l'importance de la prise en compte du paysage et de sa résistance.

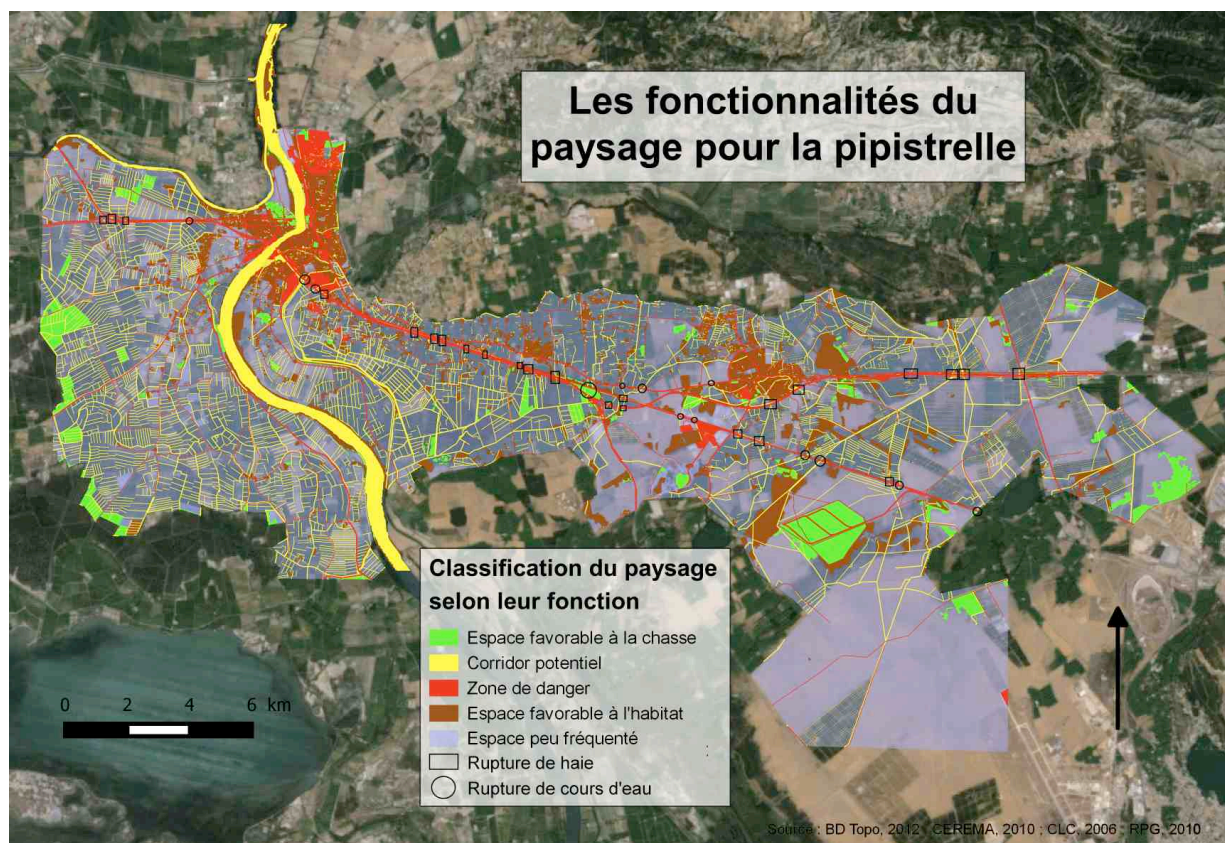
Ainsi, en écologie du paysage, le modèle de moindre coût a une grande importance pour les graphes paysagers permettant de discriminer des espaces par rapport à d'autres. Ici, les infrastructures routières sont les plus concernées car ce sont les principaux facteurs de fragmentation [Garcia-Gonzalez C. et al., 2012], eux même définis comme la première cause de perte de biodiversité par le Millenium Assessment (2000) [Millenium Ecosystem Assessment, 2005]. A partir des résultats de ce modèle ainsi que d'une interprétation cartographique, il sera possible d'identifier les fonctionnalités du paysage qui ont été amputées et les lieux où il serait pertinent de rétablir des connexions.

3.1.3 Des fonctionnalités amputées, certaines connexions à rétablir

Les précédentes analyses ont montré l'impact des grandes infrastructures de transport sur la connectivité des habitats de l'espèce cible. Ces infrastructures se placent comme des barrières quasiment infranchissables et peuvent perturber les interactions à l'intérieur des différents écosystèmes et entre eux. A partir de la cartographie des fonctionnalités du paysage (Carte 6, chapitre 2.3.2.1), il s'agira d'identifier les espaces impactés et présentant un réel enjeu et où il pourrait être pertinent de rétablir des connexions.

Tout d'abord, rappelons que les principaux corridors pour les pipistrelles sont les haies et les cours d'eau. Cependant, certaines routes peuvent créer une rupture de ces éléments qui pouvait autrefois exister. Il est donc possible de les identifier à travers la cartographie des fonctionnalités ainsi que des images satellites (Carte 14).

Carte 14 Des fonctionnalités paysagères amputées



Ici, l'identification de ces ruptures s'est faite sur les grandes infrastructures routières soit l'A 54, la RN 113 et la LGV. 13 ruptures de cours d'eau et 24 ruptures de haies ont été relevées. Dans le premier cas, le réseau hydrographique passe en dessous de l'infrastructure de transport

et peut se placer comme un passage à faune si la linéarité du paysage permet aux pipistrelles d'y accéder. Pour certaines espèces, ces tunnels peuvent se placer comme des passages à faune même s'ils n'ont pas été créés dans ce but là. Cependant, cette fonction varie selon les espèces car elle dépend de nombreux facteurs avec principalement le niveau de l'eau, les aménagements internes et la

Photo 17 Passage à faune simple : buse



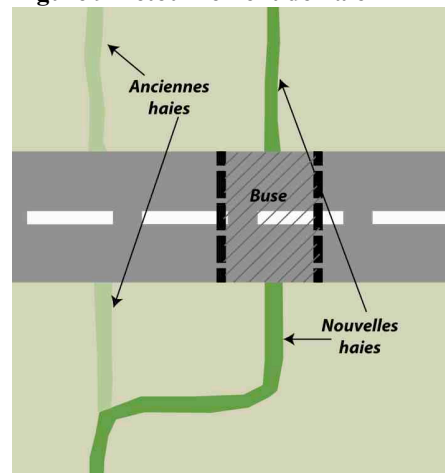
taille de la structure. Une étude directement sur le terrain permettrait de décrire chacun d'entre eux. En ce qui concerne les haies, il semble être primordial de rétablir certaines connexions en favorisant la continuité de ces éléments paysagers à travers les routes. Des passages à faune, sous forme de buse notamment (Photo 17), pourrait permettre de rétablir une certaine transparence écologique. Notons également que des aménagements visant à faire passer les pipistrelles au dessus des infrastructures pourraient être envisagé mais la littérature a montré l'efficacité des passages souterrains [Tournant P., 2014 ; CEREMA, ex-Sétra, ex-CETE de l'Est, ex-CETE Normandie-Centre, 2009].

Par ailleurs, ces ruptures se répartissent sur l'ensemble des infrastructures. Néanmoins, on note que les portions entre Saint-Martin-de-Crau et Arles, et plus particulièrement le tronçon de jumelage entre la RN 113 et la LGV, sont les plus touchés. De plus, précédemment, on avait émis l'hypothèse que de nombreux échanges entre la Crau d'Arles et les autres unités paysagères au sud de cette portion étaient fortement limités malgré l'importance qu'ils pouvaient représenter. Il paraît donc essentiel de rétablir certaines connexions afin de favoriser la transparence écologique de ces infrastructures.

Enfin, au delà des ruptures des corridors pour la pipistrelle de nombreux autres espaces sont fragmentés. Certains habitats ou espaces de chasse pour la pipistrelle ont pu être impactés par les routes en étant divisés, d'autres, même s'ils ont été évités, ont pu être isolés entre différentes portions routières. C'est notamment le cas pour l'échangeur à l'ouest de Saint-Martin-de-Crau. Restaurer une connexion avec ces espaces n'est pas forcément le plus pertinent car les zones les plus impactées ont déjà fortement subi la pression anthropique et ne serait peut-être pas efficace.

Les infrastructures de transport créent donc des ruptures sur certains corridors naturels que sont les haies et les cours d'eau pour la pipistrelle. Afin de pouvoir parler de transparence écologique, il serait indispensable de restaurer ces connexions à l'aide de passage à faune artificiel (Photo 17). D'autres aménagements seraient également nécessaires afin que les pipistrelles (et certainement autres espèces) convergent vers ces buses (Figure 9). Les haies seraient donc détournées : certaines seraient supprimées pour éviter les collisions et d'autres seraient créées afin de diriger les pipistrelles vers des passages sécurisés (buses) (Figure 9). Il s'agit donc de restaurer des continuités écologiques à travers le linéaire des haies. Cette mesure a montré son efficacité mais certaines espèces ne changent pas leurs habitudes et suivent toujours l'ancien tracé [CEREMA, ex-Sétra, ex-CETE de l'Est, ex-CETE Normandie-Centre, 2009]. De plus, il a été démontré que le nouveau tracé des haies ne devait pas se plaçait à plus de 50 mètres de l'ancien [CEREMA, ex-Sétra, ex-CETE de l'Est, ex-CETE Normandie-Centre, 2009]. Dans tous les cas, les objectifs seraient de limiter les collisions des pipistrelles avec les automobiles et donc de restaurer une certaine transparence écologique des infrastructures de transport. Les réseaux de transport et écologiques pourraient coexister.

Figure 9 Détournement de haie



Ainsi, ces premières analyses ont soulevé la difficulté des réseaux de transport et du réseau écologique à coexister ainsi que l'importance du paysage pour une telle étude. Certaines zones ont été mises en avant car pouvant participer à la restauration d'une certaine transparence écologique des infrastructures de transports. La Crau d'Arles, le petit Plan de Bourg, le Grand Plan de Bourg et les marais de Chanoines et de Meyranne semblent présenter le plus d'enjeux. De plus, il serait indispensable que le projet de contournement d'Arles tienne compte de l'ensemble des enjeux liés à la biodiversité afin de limiter au maximum la rupture des connexions. Malgré cela, l'espace ayant déjà subi de fortes pressions anthropiques, il semble difficile de restaurer une continuité écologique à l'intérieur des différents paysages et entre eux. L'analyse de la connectivité des habitats, à travers les graphes paysagers, permettra de mieux comprendre les mécanismes et les interactions entre les différents espaces. Il sera également possible d'analyser l'impact probable du projet de contournement d'Arles ainsi que l'apport des jumelages d'infrastructures routières.

3.2 Analyse de la connectivité des habitats

Précédemment, une première approche de notre modèle a permis d'analyser notre terrain d'étude. Les mesures utilisées nous ont fait comprendre l'importance du paysage et de ses éléments. On a également pu observer que certaines connexions pourraient être rétablies pour favoriser les continuités écologiques. Afin d'analyser la transparence écologique des infrastructures de transports, le modèle des graphes paysagers permettra de calculer différentes métriques de connectivité. Après avoir défini les différents indicateurs disponibles, il s'agira d'analyser les résultats.

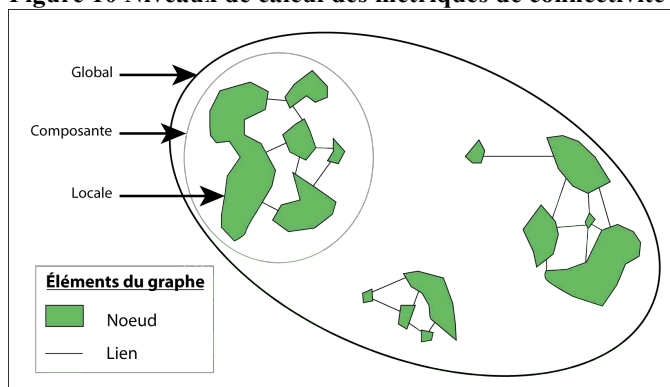
3.2.1 Définition des métriques de connectivités et premières analyses

Les graphes paysagers ont pour principale fonction de pouvoir mesurer la connectivité à travers différents indicateurs. Des états de l'art récents ont recensé plusieurs dizaines de métriques provenant principalement de la théorie des graphes [Galpern P. et al., 2001 ; Rayfield B., 2011], avec chacun leurs avantages et inconvénients [Laita A. et al., 2011 ; Pascual-Horta L. et Saura S., 2006 ; Foltête J.-C. et al., 2012]. Il s'agira donc de définir ces métriques afin de sélectionner celles qui seront utilisées dans l'analyse de notre territoire.

Tout d'abord, la connectivité paysagère est un phénomène multiscalaire [Fahrig L., 2003 ; Minor E.S. & Lookingbill T.R., 2010]. De ce fait, les graphes paysagers permettent de le mesurer sur différentes échelles (Figure 10) :

- l'échelle globale correspond à l'intégralité du graphe ;
- l'échelle par composante renvoie à un ensemble de nœuds interconnectés par des liens ;
- l'échelle locale correspond aux éléments individuels : nœud ou lien.

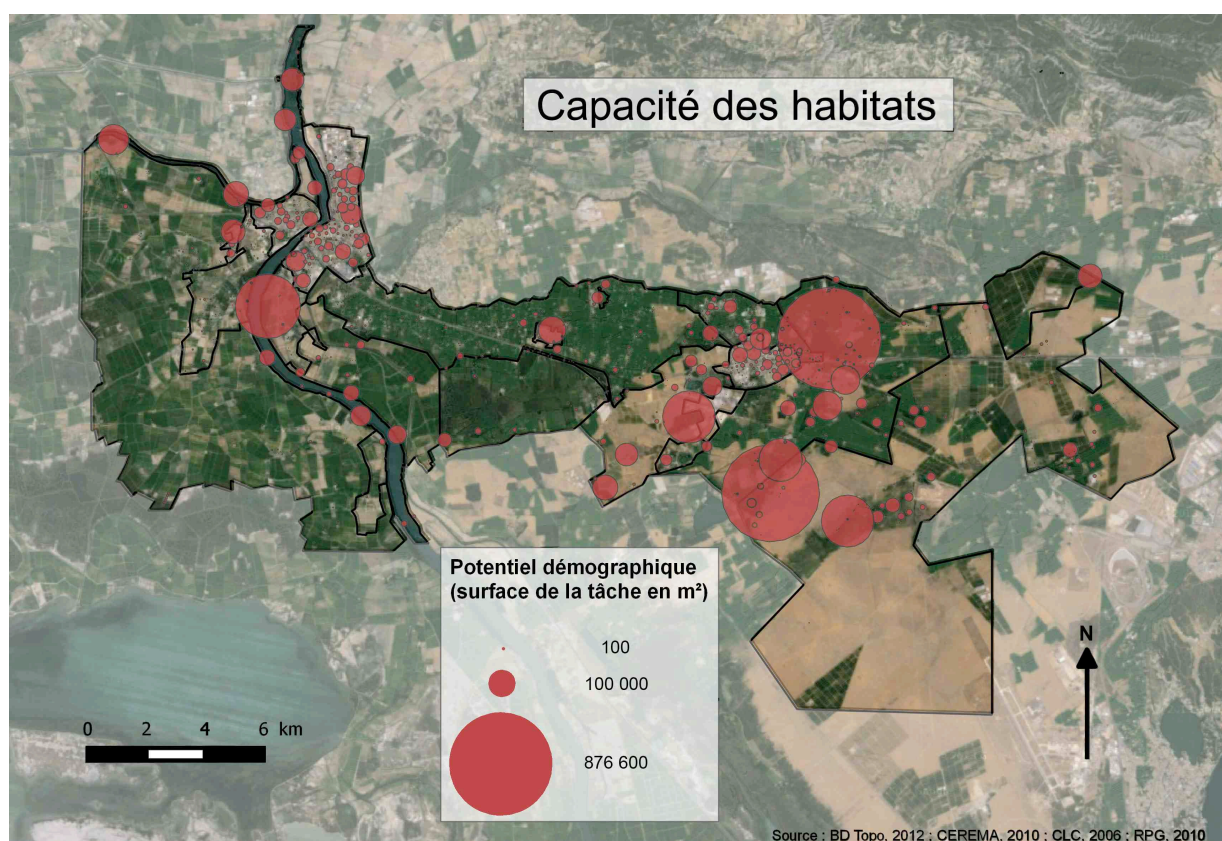
Figure 10 Niveaux de calcul des métriques de connectivité



Quelque soit l'échelle d'analyse, les métriques retenues partiront d'hypothèses écologiques sur les facteurs de dispersion. À travers la théorie des métapopulations, Urban D.L. et Keitt T.H. (2011) définissent trois facteurs qui favorisent la capacité d'une tâche à accueillir des individus d'une ou de plusieurs espèces :

- le **recrutement** (R) correspond à la capacité démographique de la population de pipistrelle des tâches. Ici, le graphe n'intervient pas et la surface de la tâche est souvent considérée comme proportionnel à cette variable. On obtient donc $R_i = A_i$ avec R la capacité démographique de la tâche i et A la surface de la tâche i (Carte 15). Dans certains cas, les tâches peuvent appartenir à différentes classes d'occupation du sol aux capacités différentes, un critère de qualité est alors considéré dans le calcul de cette métrique. Cela ne concerne pas notre modèle.

Carte 15 Capacité des habitats



On dénombre 3702 tâches avec une surface moyenne d'environ 7 182 m². Cependant, on identifie près d'un tiers des habitats avec une surface inférieure ou égale à 100 m². On note ainsi l'importance des habitats de petites tailles qui se localisent surtout au nord du fuseau d'étude entre Saint-Martin-de-Crau et Arles. Ces deux villes, plus urbanisées, ont une importance majeure en termes de taille d'habitat et pourraient se placer comme les principaux

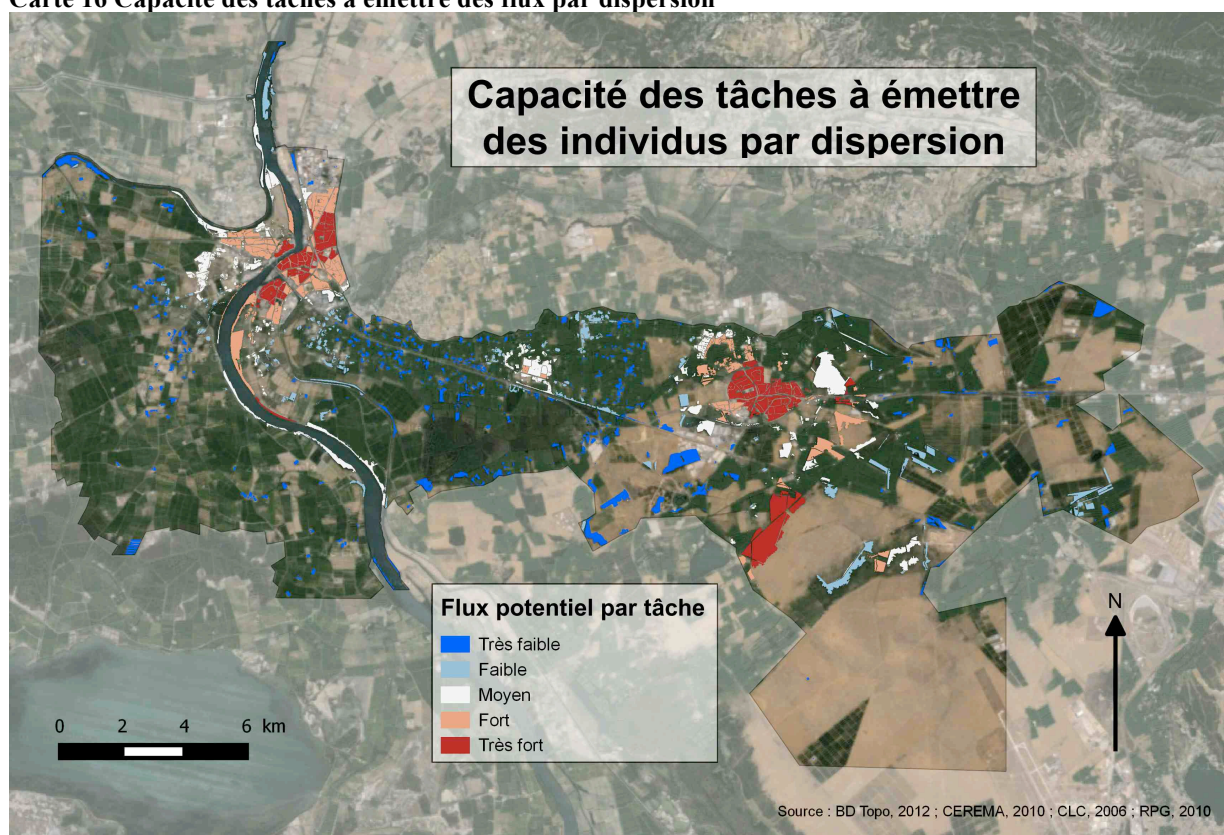
refuges des pipistrelles. Enfin, le Rhône, qui se place comme un important corridor, est également un important réservoir de vie pour les pipistrelles grâce à sa ripisylve.

- les **flux potentiels** (F) renvoie à la capacité d'une tâche à émettre des individus par dispersion. La tâche i tient compte de l'ensemble des tâches qui sont reliées à elle, celles-ci pondérées par leur capacité et une fonction décroissante de distance :

$$F_i = \sum_{j=1}^n R_j \cdot e^{-\alpha d_{ij}}$$

avec F_i les flux potentiels pour la tâche i ;
 R_j la capacité démographique de la tâche j ;
 α la plus ou moins forte croissance⁷

Carte 16 Capacité des tâches à émettre des flux par dispersion



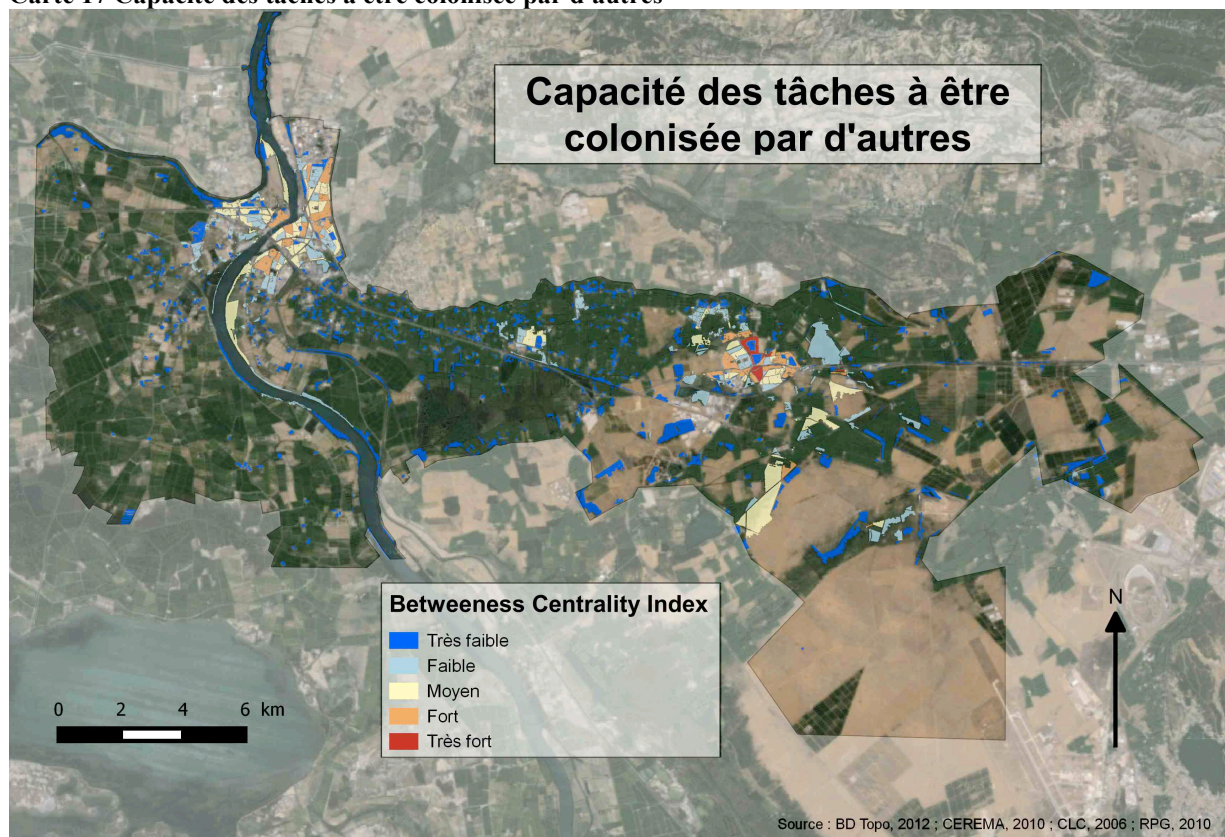
Les tâches les plus émettrices correspondent principalement aux villes, avec en premier lieu Arles et Saint-Martin-de-Crau et plus secondairement Raphèle (Carte 16). Ce résultat semble

⁷ ce coefficient est déterminé afin qu'une faible valeur de $e^{-\alpha d_{ij}}$ renvoie à une dispersion maximale. D'après Urban D.L. et Keitt T.H., on peut utiliser la valeur pour laquelle $e^{-\alpha d_{ij}} = 0,05$ soit $\alpha = \ln 0,05$.

logique étant donné la densité de bâtis qui, rappelons le, est favorable pour les gîtes des pipistrelles. Ce résultat peut cependant être en partie biaisé car, pour les villes, les tâches correspondent à la couche Corine Land Cover principalement. Il aurait été peut-être plus judicieux d'utiliser la couche bâtie de la BD Topo afin d'identifier plus précisément quels étaient les bâtiments potentiellement utilisés comme gîtes par l'espèce cible. Par ailleurs, on note l'importance de la forêt domaniale au sud de Saint-Martin-de-Crau qui peut se placer comme une considérable zone d'habitat. De nombreux échanges peuvent être supposés entre cet espace et la ville de Saint-Martin-de-Crau ainsi que son espace périurbain.

- la **traversabilité** est la capacité d'une tâche à être colonisée depuis d'autres tâches (Carte 17). Ceci est d'autant plus intéressant en cas d'extinction locale d'une espèce. Urban D.L. et al. (2009) soulève une certaine relation entre cette notion et le « *Betweenness Centrality index* » ou indice de centralité intermédiaire (BC) utilisé également en écologie par Estrada E. et Bodin O. (2009). Cet indice se base sur les parcours joignant tous les couples de tâches et consiste à additionner les tâches à chaque fois qu'elles sont utilisées dans un parcours. On peut donc parler de fréquences de déplacements.

Carte 17 Capacité des tâches à être colonisée par d'autres



Ici aussi, les espaces les plus importants semblent être les trois villes ainsi que la forêt au sud de Saint-Martin-de-Crau. On remarque également que le BC augmente au plus on s'approche des centres urbains. En effet, les tâches d'habitat y sont plus proches et en plus grand nombre, elles sont donc plus souvent traversées car moins exclus. Par rapport à F, on note quelques tâches au sein de Saint-Martin-de-Crau qui se distinguent des autres de par leur forte centralité. Cependant, cela peut être dû aux limites du territoire que nous nous sommes fixés. En effet, Arles est en bordure de ces limites et les tâches qui pourraient se trouver à proximité ne sont pas prises en compte.

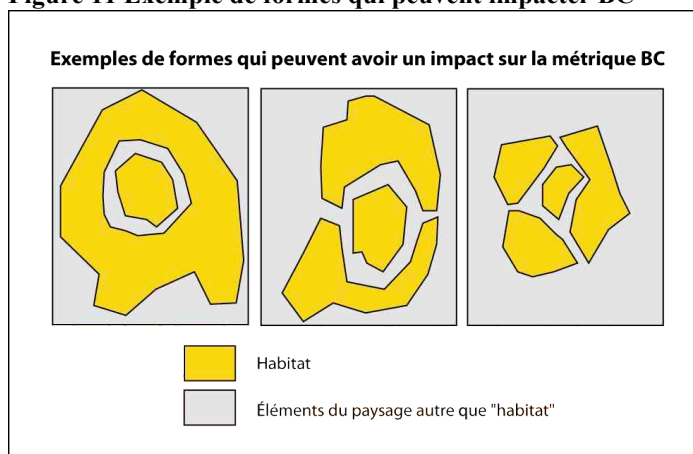
Il est également possible de soulever le fait que certaines tâches, au cœur du tissu urbain ont une centralité très faible alors que l'on

aurait pu penser le contraire. Il est possible que ce soit du au fait qu'une ou plusieurs tâches se placent autour de celle-ci. Dans le graphe planaire mis en place, un parcours ne peut pas transiter deux fois par la même tâche ou croiser d'autres parcours. Certaines formes d'habitats et de paysage

peuvent donc fausser la représentation de la réalité (Figure 11). Certains habitats ont même une valeur égale à zéro alors qu'ils se placent au cœur d'Arles ou de Saint-Martin-de-Crau. Une importante limite du modèle est donc mise en évidence. Un graphe complet aurait été certainement plus proche de la réalité. BC ne pourra pas être utilisée dans notre étude du fait de sa faible robustesse.

Ainsi, la connectivité du paysage peut être mesurée grâce au modèle des graphes paysagers et le logiciel Graphab 1.2 qui permet de calculer de nombreuses métriques sur différentes échelles d'analyse. En ce qui concerne la connectivité des habitats et leurs capacités d'accueil, le recrutement, les flux potentiels et la traversabilité ont été identifiés comme les trois facteurs principaux. Ils peuvent être mesurés à travers trois indicateurs qui sont respectivement : la capacité démographique de la pipistrelle, les flux potentiels et l'indice de centralité intermédiaire. Le dernier ne sera pas retenu pour les futures analyses car il pourrait conduire à de fausses conclusions. Dans tous les cas, il semble que les métriques amènent à des conclusions similaires faisant ressortir le poids des centres urbains. Par ailleurs, les métriques locales peuvent être interpolées afin qu'une valeur soit affectée à chaque pixel du carreau.

Figure 11 Exemple de formes qui peuvent impacter BC



Cependant, cette étape n'a pas été réalisée car elle offre une faible plus value d'une part et les temps de calculs impliqués sont beaucoup trop longs d'autre part. Enfin, ils existent d'autres métriques au niveau global et au niveau des composantes qui n'ont pas été détaillées dans cette partie. Dans le premier cas, il est plus pertinent d'avoir un élément de comparaison et donc différents modèles, elles seront donc utilisées par la suite. Dans le second, on a vu que tous les nœuds de notre modèle sont interconnectés : il n'existe donc qu'une seule composante qui correspond aux métriques globales. Par ailleurs, à l'aide des métriques globales, il sera possible de calculer des delta-métriques qui permettront d'identifier les tâches les plus importantes. Dans tous les cas, l'ensemble des métriques seront analysées dans les prochaines parties afin d'observer si elles évoluent de manière identique ou non. Pour cela, il s'agira d'analyser les impacts du projet de contournement ainsi que les effets des jumelages.

3.2.2 *Importance des tâches dans le modèle : les delta-métriques*

Certaines métriques calculées au niveau global peuvent indirectement permettre des mesures à l'échelle locale, c'est ce qu'on appelle les delta-métriques. Elles consistent en une méthode dite de suppression itérative [Urban D.L. et Keitt T.H., 2011], c'est-à-dire que pour chaque élément du graphe, un taux de variation est mesuré entre la valeur calculée pour l'intégralité du graphe et la valeur obtenue suite à la suppression de l'élément concerné. De cette manière, il est possible de quantifier l'importance des tâches ou liens par rapport à la structure globale et ainsi d'aborder les problématiques multiscalaires de l'écologie du paysage.

De nombreuses métriques sont utilisées dans la littérature. Deux seront retenues car elles sont très utilisées et ont montré leur pertinence [Saura S. et Pascual-Horta L., 2007 ; Pascual-Horta L. et Saura S., 2006]. Toutes les deux se basent sur la disponibilité et la qualité des habitats :

- l'indice intégral de connectivité (IIC) considère les connexions établies entre deux tâches au sein du paysage et tient compte de la taille des tâches et du nombre de liens dans le plus court chemin les reliant [Avon C. et Bergès L., 2013 ; Saura S. et Torné J., 2009]. IIC a montré de bons résultats dans des études mesurant la diversité génétique [Neel M.C., 2008].

avec a_i et a_j attribut de la tâche

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \times a_j}{1 + nl_{i,j}}}{A_p^2}$$

nl le nombre de liens / connexions dans le chemin le plus court entre les tâches a_i et a_j

A_p attribut du paysage maximal

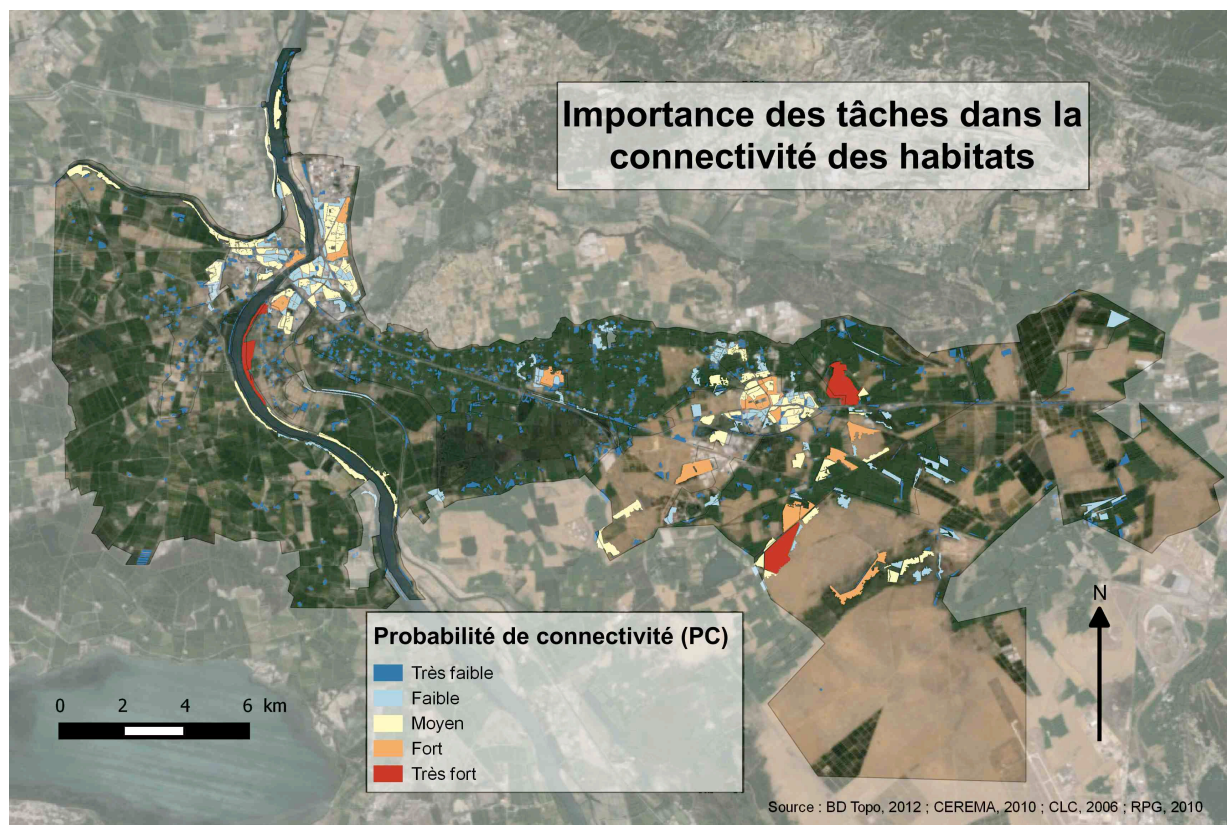
- la probabilité de connectivité (PC) est la probabilité que deux points placés aléatoirement dans le paysage se situent dans les zones d'habitat qui sont accessibles à partir de l'autre [Avon C. et Bergès L., 2013]. Cette métrique prend en compte la dispersion en termes de probabilité et non de manière binaire comme IIC. Cet indice a montré de bons résultats en ce qui concerne le flux d'organismes indépendamment de leur origine [Awade M. et al., 2012].

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{i,j} \times a_i \times a_j}{A_p^2}$$

avec a_i et a_j attribut de la tâche
 $p_{i,j}$ produit de probabilités maximale (probabilité cumulative de dispersion)
 A_p attribut du paysage maximal

Les deux métriques sont fortement corrélées (coefficient de corrélation de Pearson = 0,88) et il n'est donc pas utile d'analyser les deux métriques. Le choix s'est porté sur PC (Carte 18) car il se focalise sur les flux de populations de pipistrelles [Awade M. et al., 2012] de la même manière que la métrique F déjà utilisé précédemment. Malgré cela, F et PC sont très peu corrélés (0,25) et peuvent amener à des conclusions différentes. En effet, F se focalise sur les flux de populations des tâches alors que PC vise à analyser l'importance des tâches sur l'intégralité du modèle.

Carte 18 Importance des tâches dans la connectivité des habitats mesurés à travers la métrique PC



Toute la ripisylve du Rhône, et plus précisément la partie au sud d'Arles, présente une grande importance en ce qui concerne la connectivité des habitats sur notre terrain d'étude. Les deux forêts à proximité de Saint-Martin-de-Crau sont d'une très forte importance et se place également comme un important réservoir de vie. De plus, on peut supposer des échanges entre ces deux espaces et cette zone pourrait présenter d'importants enjeux de reconnexion. À la différence de F, cette métrique permet de faire ressortir l'importance des grands espaces naturels. Elle limite également le poids des centres urbains où les aménagements en vue de restaurer une transparence écologique seraient difficiles voire impossible.

Ainsi, la protection de ces espaces naturels est un enjeu majeur. Cela passe essentiellement par la protection de la ripisylve du Rhône qui est un important réservoir de vie et un important corridor écologique pour les pipistrelles. Il est également essentiel de protéger les forêts et de restaurer des connexions entre elles.

3.2.3 Impacts du projet de contournement

Le projet de contournement d'Arles, malgré ses intérêts socio-économiques, a de nombreux impacts sur l'environnement et la biodiversité. Le modèle des graphes paysagers permettra de mesurer les effets sur la connectivité à différentes échelles.

3.2.3.1 Impacts mesurés à l'échelle du territoire

L'échelle globale correspond à l'ensemble de notre terrain d'étude. Dans notre cas, les nœuds étant tous interconnectés, cela correspond à l'ensemble des nœuds et liens du terrain d'étude. De nombreuses métriques peuvent être calculées (10 dans Graphab). Nous en retiendrons 3 (Tableau 8) qui sont sensiblement les mêmes que celles décrites précédemment pour les métriques locales :

- les flux potentiels (F) ;
- de la même manière que pour les delta-métriques, la disponibilité des habitats, qui se rapproche du principe de la métrique BC⁸, peut être mesurée soit avec la probabilité de connectivité (PC) soit avec l'indice intégral de connectivité (IIC). Il sera pertinent de comparer les deux métriques.
- la taille moyenne des surfaces ou « *Mean Size of Components* » (MSC)

Tableau 8 Comparaison des métriques globales sans et avec le projet de contournement

Métriques	Modèle sans contournement	Modèle avec contournement	Taux d'évolution
F	1,04 ^{E+9}	1,06 ^{E+9}	-2,48 %
PC	2,26 ^{E-5}	2,31 ^{E-5}	-2,26 %
IIC	7,32 ^{E-5}	7,31 ^{E-5}	-0,04 %
MSC	2,217 ^{E+7}	2,215 ^{E+7}	-0,06 %

On note des différences plus ou moins significatives entre les deux modèles défavorables pour celui avec le projet de contournement. Au delà des impacts directs sur les habitats, qui semblent

⁸ BC est une métrique locale qui ne peut être calculé au niveau globale par Graphab c'est donc pour cela qu'une nouvelle métrique a été choisie d'après la littérature.

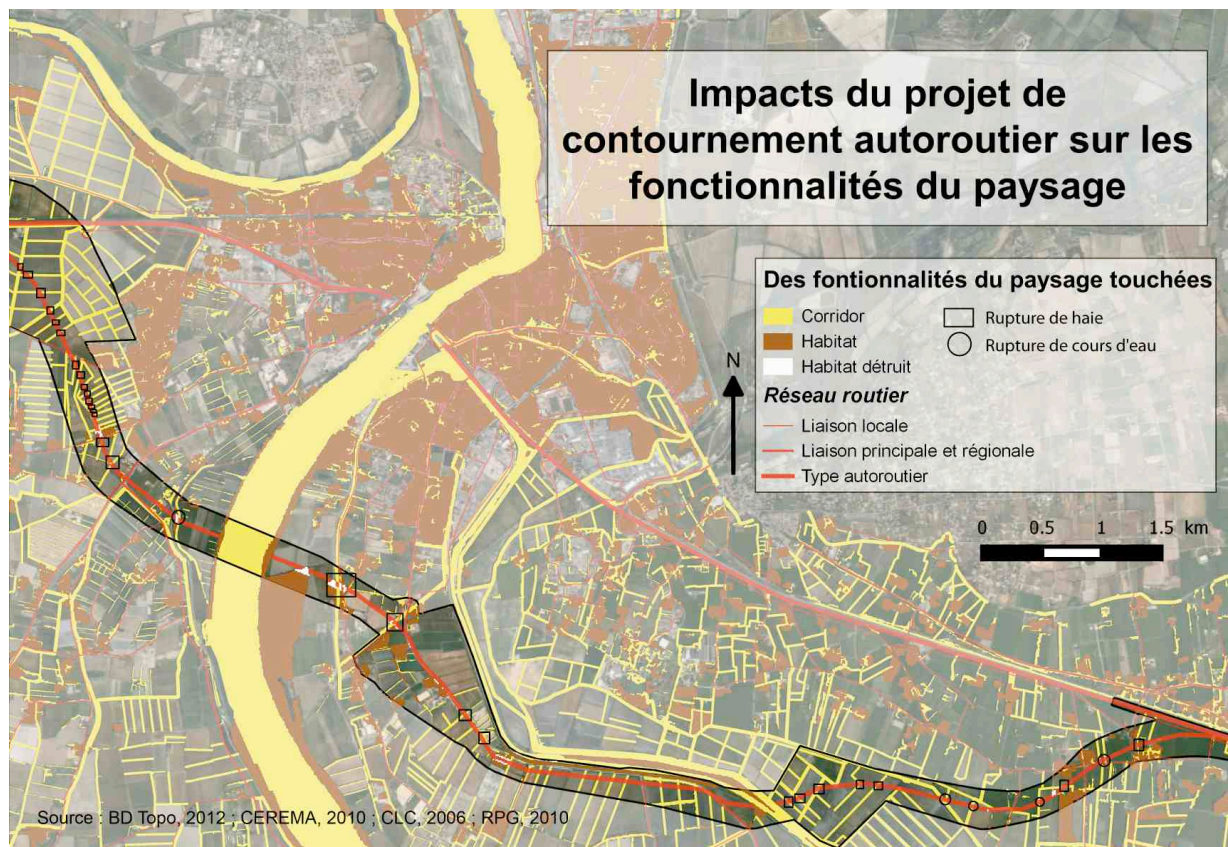
être relativement faibles, avec notamment la réduction de la taille de certains habitats (perte de 0,06 % (MSC) d'un modèle à l'autre) et l'augmentation du nombre de fragments (3703 tâches dans le modèle avec le projet de contournement contre 3702 dans le modèle sans), des impacts sur la connectivité peuvent apparaître à une distance plus ou moins importante de cette nouvelle infrastructure. Les flux potentiels et la probabilité de connectivité perdent plus de 2 % d'un modèle à l'autre et montrent que les impacts ne sont pas uniquement liés aux effets de la fragmentation et de nombreux habitats pourraient subir la suppression de certaines connexions. Les métriques locales permettront d'analyser plus précisément le phénomène. Par ailleurs, on note une différence relativement significative entre IIC et PC. Cela peut signifier que, malgré l'impact sur le flux de notre espèce cible, la diversité génétique serait peu touchée car les tâches d'habitats sont relativement grandes. Elles ont donc une assez grande capacité démographique pour assurer une importante diversité génétique.

Ainsi, le projet de contournement autoroutier peut avoir des impacts à l'échelle de toutes nos unités paysagères. Cependant, les métriques montrent que ces effets sont relativement faibles. Afin d'observer des impacts globaux, il aurait pu être pertinent de modéliser à nouveau à l'échelle des unités paysagères concernées par le contournement, voire de le calculer pour chaque unité paysagère. Il aurait été possible de comparer les résultats pour observer l'impact sur chaque unité paysagère.

3.2.3.2 Impacts sur les fonctionnalités du paysage

Comme vu précédemment, le projet de contournement peut avoir des effets directs sur les habitats de par l'espace physique qu'il occupera. De ce fait, de nombreuses fonctionnalités peuvent être amputées (Carte 19).

Carte 19 Impacts du projet de contournement sur les fonctionnalités



Si on se fie au modèle, 22 habitats disparaîtraient totalement, 8 pourraient voir leur taille se réduire et 5 seraient divisés en deux avec une diminution de leur taille. Cela correspondrait à une perte de plus de 30 hectares soit 3 % de la surface totale des habitats. De plus, il faut rajouter à cela les nombreuses autres fonctionnalités qui pourraient être touchées. Les terrains de chasse, également impactés, ne sont pas forcément tous indispensables pour la pipistrelle qui s'accommode très bien au territoire et parvient à trouver de nombreux espaces pour se nourrir. Par contre, les corridors (haies et cours d'eau), qui eux sont essentiels pour les déplacements de l'espèce cible, sont très touchés. Le projet de contournement traverserait le Grand Plan de Bourg, le Petit plan de Bourg, le Rhône, le bocage de Gimeaux et le nord de la Camargue cultivée. Le Rhône est un important corridor, comme nous avons pu le voir, mais ne devrait pas être beaucoup affecté car un pont le traverserait : sa ripisylve ainsi que son lit devrait être préservés. En ce qui concerne les autres unités paysagères, elles abritent toutes un réseau hydrographique important ainsi que de nombreuses haies qui découpent les parcelles. La Carte 19 montre que vingt sept haies et cinq cours d'eau seraient coupés. C'est presque autant que le nombre de ruptures actuelles sur l'intégralité du terrain d'étude. Les haies semblent très abondantes dans la Camargue cultivée et cet espace serait le plus sensible. Il semble donc

important de prendre en considération ces éléments lors de l'aménagement de l'infrastructure afin de préserver ces continuités.

Ainsi, l'aménagement de l'infrastructure pourrait amputer de nombreuses fonctionnalités paysagères. Le projet n'étant pas encore validé, il serait important de prendre ces éléments en considération notamment en privilégiant la mise en place de certains passages à faune. L'analyse de la connectivité démontrera la pertinence de ces propos et viendra valider ou infirmer la nécessité de préserver les continuités écologiques.

3.2.3.3 Impacts sur la connectivité des habitats : mesures locales

Le projet de contournement d'Arles cache de nombreux enjeux environnementaux et liés à la biodiversité et ce sur différentes échelles. Sur l'ensemble de notre territoire l'impact est faible mais à échelle locale de nombreuses fonctionnalités sont amputées avec notamment de nombreux habitats et corridors touchés. On peut donc d'ors et déjà supposer que la connectivité des habitats serait réduite. Il s'agira donc ici d'identifier les zones les plus sensibles en observant la variabilité des métriques.

Tout d'abord, rappelons que le potentiel démographique des habitats est proportionnel à leurs surfaces. Il dépend donc essentiellement de l'emprise physique de l'infrastructure routière. Comme vu précédemment (chapitre 3.2.3.2), l'incidence n'est pas des plus alarmantes mais on note tout de même un impact sur 37 habitats dont 22 disparaîtraient totalement. Or, la plupart des habitats touchés sont de petite taille et, selon le modèle, abritent donc une petite population. Sur les 22 habitats 20 ont une surface inférieure à 100 mètres.

Ensuite, au delà des impacts dits directs, des impacts peuvent se faire ressentir sur certaines métriques à plus large échelle. C'est le cas notamment des flux, mesuré avec la métrique F. Cependant, il ne semble pas possible de comparer les deux modèles. En effet, la première solution serait d'interpoler les métriques F de chacun des modèles et de les comparer mais, comme nous l'avons vu, cette méthode est trop coûteuse. L'autre possibilité serait un modèle de distribution d'espèces [Guisan A. et Zimmermann N.E., 2000 ; Foltête J.C. et al., 2011] qui permettrait de prédire la présence ou non d'une espèce, en tenant compte de l'impact de la nouvelle infrastructures en question. Or, cette méthode nécessite des données d'observation de

terrain que nous ne possédons. Une analyse de l'impact de cette future infrastructure est donc difficile.

Ainsi, notre modèle ne permet pas réellement de mesurer l'évolution de la connectivité avant et après la mise en place du projet de contournement. Cet objectif nécessiterait des études d'impact bien cibler avec plus de données en entrée. Dans notre cas, les données à disposition ainsi que les limites liés aux outils semblent réduire les possibilités d'une étude diachronique. Par ailleurs, l'analyse de l'impact d'une nouvelle infrastructure par comparaison des métriques au temps T (actuellement) et $T+1$ (après la mise en œuvre de la nouvelle infrastructure de transport) ne tient pas compte de la phase de chantier. Pourtant, cette étape peut durer plusieurs mois et peut engendrer la perte temporaire de plusieurs habitats sur une bande beaucoup plus importante que celle du tracé fianl [CEREMA, ex-Sétra, 2000].

3.2.4 Analyse de sensibilité : distance d'impacts et effets de jumelage

Le modèle mis en place a été le fruit de nombreux choix arbitraires qui peuvent avoir un impact sur les résultats. On a supposé un quasi effet de barrière des autoroutes et des voies ferrées qui s'opposent à des impacts plus limités des routes ayant une vocation moins importante. A partir d'une analyse de sensibilité, il sera possible d'analyser en termes de flux potentiels, de nouvelles informations supposant des effets amoindris du réseau autoroutier.

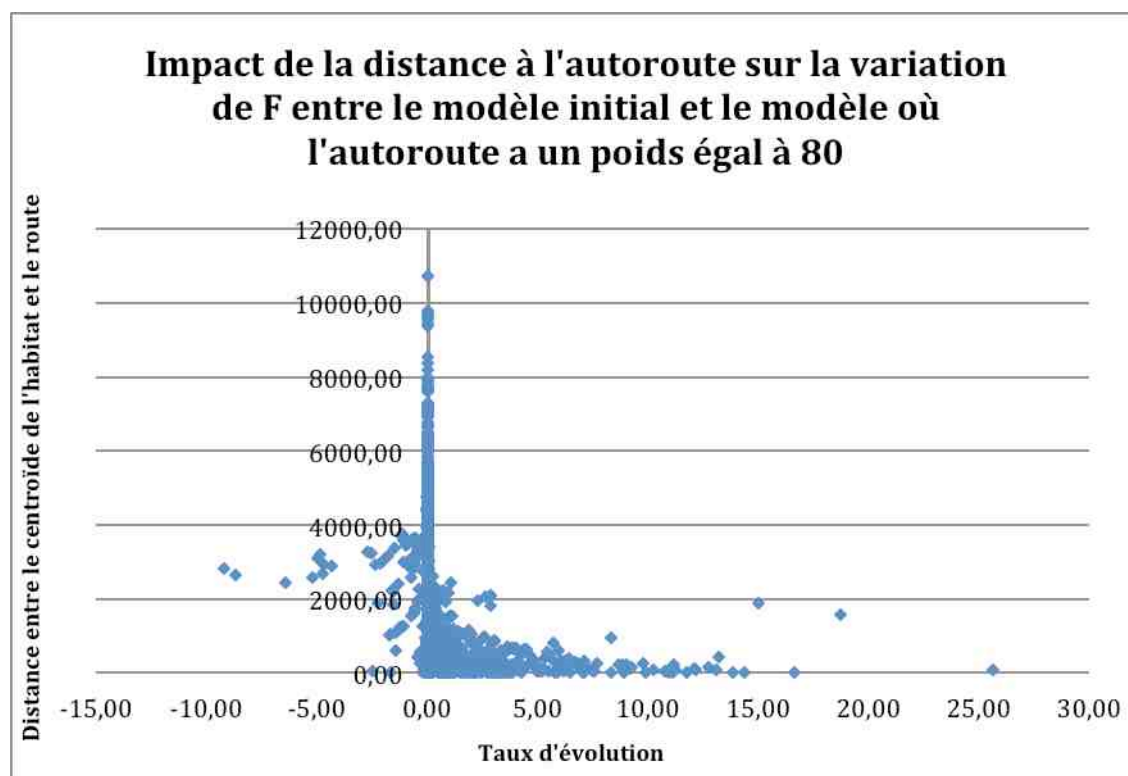
Pour cette analyse, différents modèles ont été mis en place. Les poids sont restés identiques pour l'ensemble des éléments paysagers hormis les autoroutes. Pour cela le modèle sans le projet de contournement a été utilisé et quatre valeurs différentes ont été affectées aux autoroutes :

- 100, soit le modèle d'origine ;
- 80 : l'impact est moins important que celui de la voie ferrée mais plus important que l'ensemble des autres infrastructures routières ;
- 50 : l'effet est similaire à celui des grands axes routiers comme la RN 113 ;
- 20 : il se place comme un élément neutre dans le paysage.

Tous les modèles sont corrélés entre eux avec un r^2 de Pearson à plus de 0,90 dans toutes les combinaisons possibles. A l'échelle globale, l'impact est donc très faible et c'est au local que les conclusions seront les plus intéressantes. Pour la suite de cette partie, seuls les résultats obtenus à travers le modèle où le poids de l'autoroute est de 80 sera présenté car les conclusions sont identiques dans les trois cas, étant donné la forte corrélation des modèles. Ce choix s'explique par le fait que ce modèle est le plus proche de la réalité : on sait que les autoroutes ont un important impact sur la connectivité des habitats mais on peut le supposer inférieur à celui d'une LGV.

Tout d'abord il est possible d'analyser l'impact en fonction de la distance à l'autoroute. Pour chaque nœud, la distance à l'autoroute est calculée. Puis, un taux de variation entre le modèle initial et chacun des modèles est calculé. En combinant les deux variables, on obtient le Graphique 2.

Graphique 2 Variation de F entre le modèle initial et le modèle où le poids de l'autoroute est égal à 80

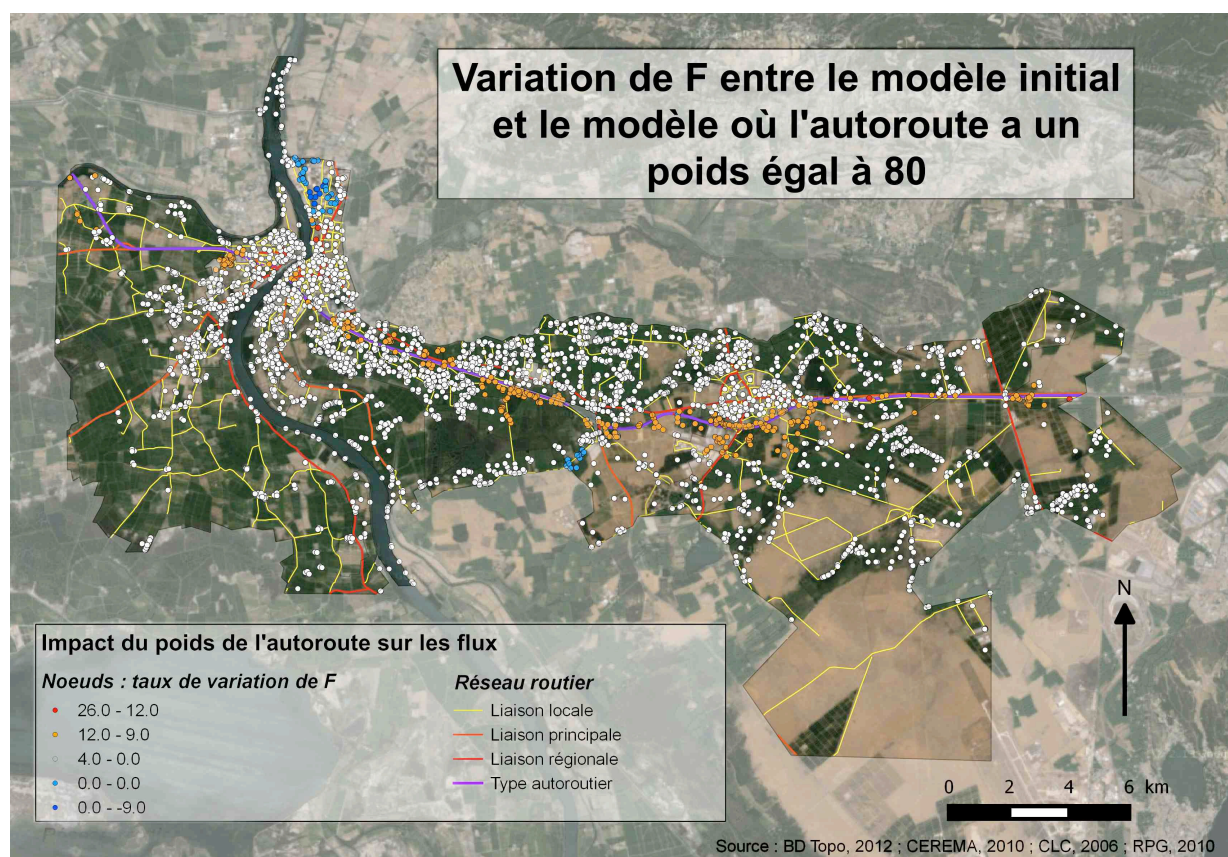


Jusqu'à 2 000 mètres, le taux de variation de F, entre le modèle initial et le modèle où le poids de l'autoroute est égal à 80, est majoritairement positif et décroît au plus on s'éloigne de l'infrastructure autoroutière. Entre 2 000 et 4 000 mètres ils continuent de décroître mais est négatif. Au delà, le taux de variation de F est égal à 0. L'impact de l'infrastructure autoroutier est donc plus important au plus on est près de celle-ci mais peut avoir un impact positif sur les

flux à partir d'une certaine distance. Le fait que des connections soient interrompues ou rendues impossibles par les infrastructures de transport pourraient obligés les espèces à se déplacer autrement et ainsi à accroître les flux entre certaines tâches. Ici, les seuils de 2 000 et de 4 000 pourrait s'expliquer par le seuil choisi dans le graphe qui est de 2 000. Afin de vérifier cela, une analyse de sensibilité sur le seuil du graphe aurait été pertinente. Une comparaison avec un modèle non seuillé aurait permis d'identifier s'il existait réellement cet effet positif sur les flux. Cette analyse ne sera pas réalisée car le temps imparti pour élaborer ce document est trop court.

Par ailleurs, il est possible de cartographier ce taux de variation afin d'observer s'il existe des disparités spatiales de l'impact de l'autoroute sur les flux de pipistrelles (Carte 20).

Carte 20 Variation de F entre le modèle initial et le modèle où l'autoroute a un poids égal à 80



F est impacté positivement sur presque l'ensemble de fuseau d'étude mais n'a pas la même portée selon les espaces. Malgré leur proximité immédiate à l'autoroute, le F des nœuds des espaces urbanisés (Arles et Saint-Martin-de-Crau notamment) ne varie pas. On peut supposer que, sur des espaces où la densité de route est forte, l'intégration d'une nouvelle infrastructure de transport n'a peu voire aucun effet sur les réseaux écologiques. Le contournement de Saint-

Martin-de-Crau a donc un impact néfaste au sud de la ville qui peut se faire ressentir jusqu'à 2 000 mètres. Par ailleurs, les jumelages semblent limiter la variation : seuls les nœuds à proximité immédiate sont touchés. Ils participent donc à limiter la portée des effets néfastes des infrastructures de transport. À notre connaissance, aucune étude n'a permis de définir les seuils de jumelage. Notre étude ne le permet pas non plus mais il pourrait être judicieux de refaire tourner des modèles en faisant varier la distance entre deux infrastructures jumelées comme l'A 54 et la RN 113.

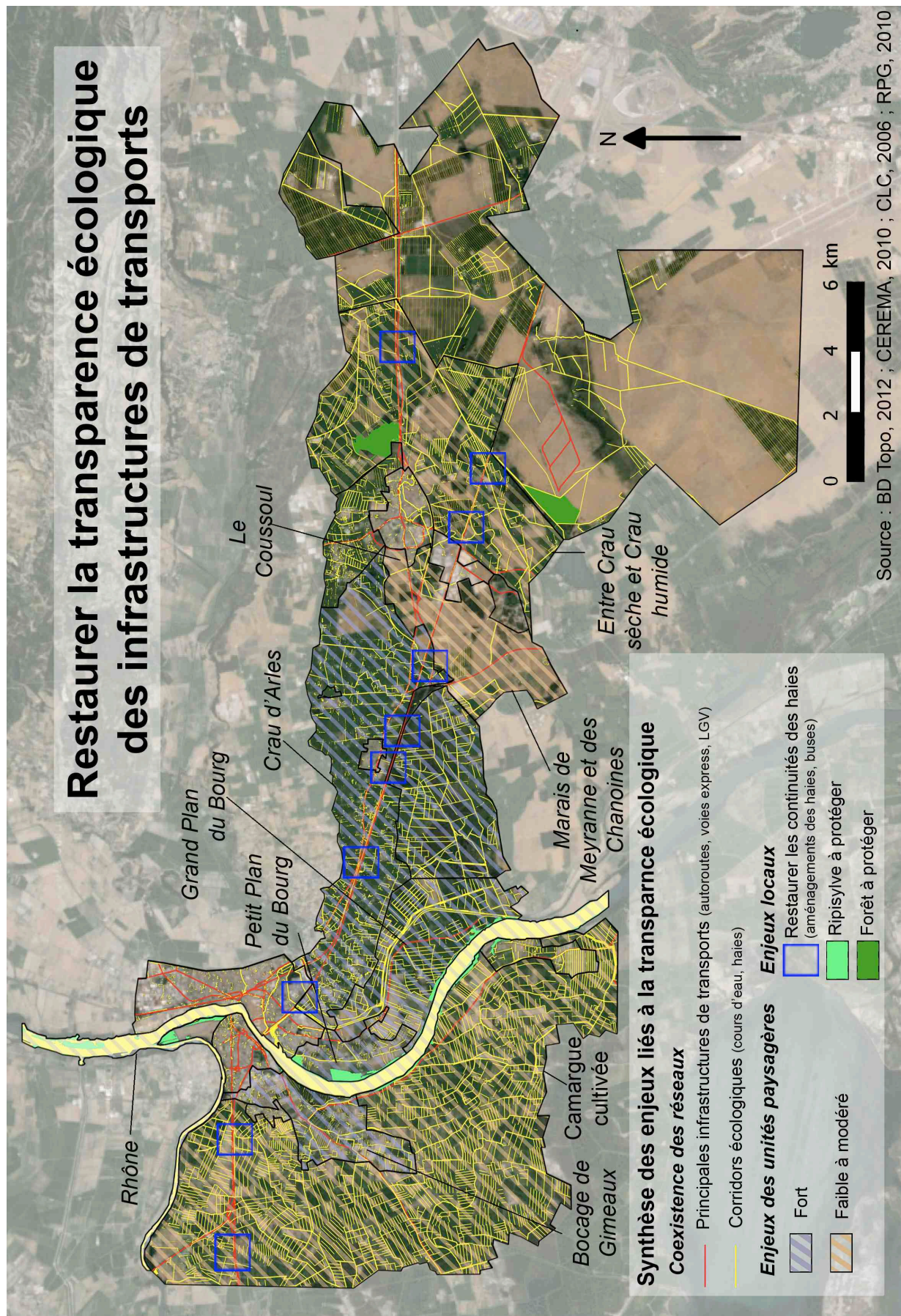
Enfin, F varie de manière négative au nord d'Arles et au sud de l'échangeur à l'ouest de Saint-Martin-de-Crau. Cela peut signifier que lorsque certaines connexions sont amputées, certaines pipistrelles peuvent se diriger vers de nouveaux habitats. Plus précisément, dans un habitat donné, elles peuvent toutes se diriger vers les mêmes habitats ce qui peut impacter la diversité génétique.

Ainsi, cette analyse de sensibilité a permis de valider l'intérêt des jumelages. En effet, il semble que l'impact de deux infrastructures jumelées soit moins important que le cumul des deux disjointes. Pour cette analyse, F a été utilisée mais cela aurait également pu être vérifié à travers d'autres métriques. Par exemple, les delta-métriques auraient permis d'analyser l'impact sur l'importance des tâches au sein du terrain d'étude. Malgré l'absence de cette analyse, on peut supposer que le résultat serait sensiblement identique. Par ailleurs, il serait intéressant de déterminer la distance seuil de séparation entre deux infrastructures de transport qui permettrait de dire qu'elles sont jumelées : jusqu'à quand peut-on observer des effets positifs ?

Ainsi, cette étude a montré qu'il existait de nombreuses connexions à rétablir sur l'ensemble du terrain d'étude afin de restaurer une transparence écologique. La cartographie des fonctionnalités du paysage a permis d'observer les corridors amputés. En termes d'aménagement, il semble que les buses, couplées au détournement de certaines haies, pourraient permettre de restaurer les continuités écologiques et ainsi favoriser la transparence écologique des infrastructures de transports. Par ailleurs, à partir de nombreuses métriques de connectivité (flux, diversité génétique, importance des réservoir de vie, etc.), cette étude a mis en exergue différents enjeux spatiaux et environnementaux (Carte 21). Il est donc prioritaire de :

- protéger le Rhône, vaste corridor permettant les déplacements journaliers des pipistrelles mais également pouvant permettre les déplacements saisonniers (hivernage / estivage) ;
- protéger la ripisylve du Rhône qui se place comme un important réservoir de vie ;
- favoriser les échanges entre et à l'intérieur du bocage de Gimeaux, de la Crau d'Arles, des marais de Chanoines et de Meyranne, du petit Plan de Bourg et du grand Plan de Bourg ;
- de manière plus secondaire, préserver la Camargue cultivée, le Coussoul et l'espace hétérogène (entre Crau sèche et Crau humide) ;
- protéger les zones forestières notamment celles au sud et à l'est de Saint-Martin-de-Crau et préconiser de nouvelles plantations de haies ou de bosquets via des mesures agroenvironnementales ;
- tenir compte de l'ensemble de ces constats dans le projet de contournement autoroutier d'Arles.

Carte 21 Synthèse : restaurer la transparence écologique des infrastructures de transport



3.3 *Discussions des résultats et perspectives*

Les résultats de cette étude ont montré que les habitats se répartissaient sur l'ensemble de l'aire d'étude. Les plus importants, en termes de potentiel démographique et de capacité à émettre ou accueillir la population de chiroptères, se placent préférentiellement à l'intérieur ou à proximité des villes notamment Arles et Saint-Martin-de-Crau. Malgré l'ensemble des biais soulevés, surtout liés aux données en entrée, ces résultats peuvent être comparés à des études déjà réalisées pouvant apporter de nouvelles connaissances. D'autre part cette étude pourrait ouvrir des portes sur certaines perspectives qu'il peut être judicieux de creuser.

3.3.1 *Discussion des résultats*

L'étude des chiroptères présente de nombreuses difficultés du fait que ce sont des espèces nocturnes et volantes avec une grande variabilité de comportement et sur lequel la connaissance de l'impact des infrastructures de transport est limitée. Certaines études ont analysé l'impact de la présence des lignes ferroviaires concluant qu'elles entraînent la destruction de certains terrains de chasse ou habitats mais également la suppression de certains éléments linéaires servant de corridors (haies, alignement d'arbres, cours d'eau) ainsi que l'augmentation de la mortalité par collision [Nowicki et al., 2009 ; Tournant P., 2014]. Les chiroptères sont donc forcés de modifier leurs comportements liés à leurs déplacements en traversant des espaces ouverts, plus défavorables, voire de les contraindre à franchir cette nouvelle infrastructure [Tournant P., 2014]. De plus, la mortalité pourrait s'accroître avec le passage de voitures et la densité de trafic comme cela a déjà été démontré [Russell A.L. et al., 2009 ; Zurcher A.A. et al., 2010]. Les infrastructures de transport engendrent une fragmentation des habitats et limitent la connectivité des habitats existants. L'intégration d'une nouvelle infrastructure accroîtrait ces deux phénomènes.

L'approche utilisée dans cette étude n'a pas permis d'évaluer l'impact potentiel du projet autoroutier de contournement de la ville d'Arles. Cet objectif aurait pu être atteint à travers des mesures précises de distance d'impact. Pour cela, des données de répartition spatiale précises auraient été souhaitées ainsi qu'un modèle de distribution prédictif. P. Tournant (2014) avait estimé l'impact de la LGV Rhin-Rhône à 22 km. Si l'on suppose un impact équivalent, c'est-à-

dire que la LGV aurait un effet équivalent à une autoroute sur les pipistrelles et que le terrain d'étude de cet auteur serait sensiblement identique au notre, presque la totalité de notre territoire subirait des conséquences. Par ailleurs, comme dans de nombreuses études [Tournant P., 2014 ; Boughey K.L. et al., 2011 ; Mehr M. et al., 2011], seuls les gîtes estivaux ont été pris en compte. Or, nous savons que les migrations hivernales des chiroptères sont indispensables à leur survie et l'impact pourrait donc se répercuter à une échelle bien plus large.

Par ailleurs, de nombreuses études ont montré l'importance des éléments boisés à proximité des gîtes pour de nombreux chiroptères [Boughey K.L. et al., 2011 ; Mehr M. et al., 2011 ; Tournant P., 2014] ainsi que des points d'eau [Lookingbill et al., 2010]. Il est également démontré que la présence d'une forêt de feuillus, de conifères ou mixtes a une influence positive sur la richesse spécifique en chauve-souris [Boughey K.L. et al., 2011]. De plus, la distance à parcourir pour atteindre les terrains de chasse peut jouer un rôle majeur et une distance trop longue entre un gîte supposé et un terrain de chasse potentiel peut impliquer une absence de l'espèce. L'ensemble de ces constats a été observé pour de nombreuses espèces de chiroptères mais aucune de ces observations ne s'est appliquée aux pipistrelles. C'est donc pour cela que, dans notre étude, l'importance des espaces de chasse n'a pas été prise en compte. En effet, les pipistrelles, anthropophiles, parviennent à s'adapter à presque toutes les conditions pour chasser. Il aurait tout de même été pertinent de mettre en place un modèle qui prennent en compte différents espaces de chasse potentiels, notamment les forêts, pour la sélection des habitats [Tournant P., 2014] d'une part et pour pondérer la capacité démographique de chaque tâche [Boughey K.L. et al., 2011] d'autre part. Des différences auraient ainsi pu être observées.

Les infrastructures de transport participent à l'accroissement de la fragmentation des habitats et la réduction de la connectivité des tâches. Les petites infrastructures de transport avec une faible densité de circulation (chemin, routes, etc.) peuvent néanmoins n'avoir aucun effet et peuvent même parfois se placer comme des corridors. Ce phénomène peut s'expliquer soit par leur structure linéaire en tant que telle soit par les arbres ou lisières qui les bordent [Bissonnette J.A. et Rosa S.A., 2009]. Ce sont donc les plus grandes qui se placent comme les moins transparentes. La taille n'est pas le seul facteur défavorable, de nombreuses études ont démontré l'impact du trafic routier, notamment en termes de densité et de vitesse de circulation, sur la connectivité des habitats [Seiler A., 2005 ; Garcia-Gonzalez C. et al., 2012]. Le modèle mis en place ici n'a tenu compte que de la taille de l'infrastructure et a montré l'opacité des autoroutes et des voies ferrées. Malgré cela, une analyse de sensibilité a permis d'observer que le jumelage de deux infrastructures limitait ces effets. Jusque là les études sur les jumelages

sont rares et cette étude a donc fourni de nouvelles connaissances sur le sujet. Malgré les effets satisfaisants, les jumelages ne sont pas suffisants pour parler de transparence écologique. C'est ainsi que, comme de nombreuses études, nous avons démontré que le passage des espèces à travers l'infrastructure pouvait être favorisé par l'installation de passages à faune couplée à l'aménagement de certaines haies pour inciter les espèces à les emprunter. Cela participerait à réduire l'effet de barrières [Bach L. et al., 2004 ; Boonman M., 2011]. Bach L. et al. (2004) ont montré plus précisément, que les tunnels souterrains étaient l'aménagement le plus favorable pour les chiroptères. Sur notre terrain d'étude et d'après notre espèce cible, l'important réseau hydrographique, qui passe parfois en dessous des infrastructures de transport, peut favoriser le passage de certains individus. Afin d'identifier plus précisément les passages potentiels, une analyse sur le terrain permettrait de qualifier chacun d'entre eux selon des caractéristiques favorables notamment : le niveau de l'eau, les aménagements internes et la taille de la structure [Bielsa S. & Pineau C., 2007].

Ainsi, la théorie des graphes a permis de visualiser et d'analyser la structure et les caractéristiques de différents types de réseaux [Galpern P. et al., 2011 ; Luque S. et al., 2012]. En écologie du paysage, plus particulièrement, cela se place comme un outil efficace pour représenter les réseaux écologiques et estimer la connectivité des habitats, soit la relation entre l'espèce et son environnement [Minor E.S. et Urban D.L., 2007 ; Saura S. et Pascual-Horta L., 2007]. Cependant, différentes lacunes sont encore à pallier afin de tenir compte de l'ensemble des exigences des pipistrelles. Malgré cela, cette étude a permis de mettre en avant l'importance des jumelages pour limiter les impacts des infrastructures et l'enjeu qui réside dans le rétablissement des connexions et continuités écologiques. Dans le cadre des aménagements routiers, les passages à faune sous forme de tunnels, pourraient se placer comme une solution visant à participer à la transparence écologique des infrastructures. Le but de ces travaux est donc de protéger la biodiversité et l'environnement de l'empreinte humaine et ainsi de profiter des nombreux services que nous rendent les écosystèmes.

3.3.2 *De nombreux services écosystémiques impactés*

Préserver la biodiversité présente de nombreux enjeux environnementaux, paysagers, socio-économiques voire même sanitaires. Depuis le Millenium Assessment en 2000, la notion de coût et de services écosystémiques a pris de l'importance. La prise de conscience politique et

les avancées scientifiques ne cessent de s'accroître pour justifier la conservation et la protection de la biodiversité. Cette partie visera donc à analyser les services potentiellement impactés par le possible déclin des pipistrelles.

Tout d'abord, les chiroptères de manière générale sont de grands prédateurs d'insectes : près de 70 % d'entre eux se nourrissent essentiellement d'insectes et d'arthropodes [Arthur L. et Lemaire M., 1999 ; Schober W. et Grimmberger E., 1991]. De plus, presque toutes les familles d'insectes peuvent être des proies pour ces espèces avec principalement les papillons de nuit, les mouches, les moustiques, les termites, les criquets, les fourmis volantes, les sauterelles, les grillons et les coléoptères. Les consommations sont variables d'un chiroptère à un autre. En ce qui concerne la pipistrelle, elle peut consommer jusqu'à 600 insectes par nuit [Schober W. et Grimmberger E., 1991]. La protection des chiroptères est indispensable pour les habitants qui peuvent éviter la prolifération d'espèces nuisibles. Cela peut favoriser le bien être des habitants en limitant les piqures de moustiques. Les jardins pourraient être mieux protégé contre les insectes nuisibles aux fleurs ou potagers. Elles pourraient également protéger les cultures et jardins. À travers ces arguments, de nombreuses associations encouragent les habitants à installer des gîtes artificiels pour les chiroptères. C'est le cas, par exemple, de la LPO (Ligue pour la Protection des Oiseaux) à l'échelle nationale et de la GCP (Groupe Chiroptères de Provence) à l'échelle régionale. Par ailleurs, notre terrain d'étude renvoie à des écosystèmes de type agricole, c'est-à-dire composé de nombreuses polycultures, monocultures. À une échelle plus large, les chiroptères participent à la protection des parcelles agricoles où certaines espèces exotiques pourraient dévaster les cultures et engendrer un usage massif de pesticides qui peut notamment avoir des effets :

- sur la biodiversité avec par exemple la pollution des milieux aquatiques qui peuvent impacter la faune [Beketov M.A. et al., 2013] mais aussi des espèces qui consomment des produits « *empoisonnés* » (graines, poissons, etc.) [Bright J.A. et al., 2008]
- sur l'environnement avec principalement la pollution des sols et des eaux [Arias-Estévez M. et al., 2007]
- sur la santé de l'homme avec de nombreuses intoxications possibles, aiguës (troubles digestifs, neurologiques, etc.) [Thundiyil J.G. et al., 2008] et chroniques (cancers, atteintes dermatologiques, neurologiques, cardiovasculaires, respiratoire, etc.) [Menegaux F. et al., 2006 ; Elbaz A. et al., 2009].

L'ensemble de ces effets ont de plus un coût comme le montre un rapport du CGDD qui a calculé les coûts externes de gestion « *des pesticides dilués dans les flux annuels ruisselés dans les rivières ou écoulés des nappes de la mer* » (CGDD, 2011). Il les a estimé dans une fourchette entre 4,4 et 14,8 milliards d'euros. Ces chiffres ne tiennent pas compte des impacts sur la biodiversité et les écosystèmes, qui couleraient encore plus cher.

Par ailleurs, comme nous l'avons vu précédemment, notre terrain d'étude, et plus particulièrement la Camargue, abrite une importante biodiversité (chapitre 1.3.2). Ce territoire a donc une richesse culturelle qu'il est nécessaire de préserver. Or, l'augmentation de l'empreinte humaine sur le territoire pourrait participer au déclin de certaines espèces, de manière directe ou en participant à la perturbation de la chaîne trophique. Dans le second cas, cela pourrait être lié à la prolifération des espèces exotiques, la destruction de certaines espèces floristiques, la disparition de certaines espèces floristiques et faunistiques, etc. Au delà des effets liés aux chiroptères, de nombreuses espèces pourraient être également touchées. Par exemple, le castor d'Europe, présent aux abords des principaux cours d'eau, est défini comme une espèce protégée. C'est le cas également du hérisson d'Europe présent sur l'ensemble de notre territoire dont les routes, et plus particulièrement les grandes infrastructures de transport, ont d'importants impacts sur celui-ci. Dans le pire des scénarios, au delà de l'ensemble des services de régulation et d'approvisionnement liés à chacune des espèces présentes, l'attrait touristique du milieu pourrait diminuer.

Ainsi, de nombreux services écosystémiques sont rendus par les populations de chiroptères de notre terrain d'étude. Les pipistrelles, voire les chiroptères de manière générale, permettent principalement de réguler la prolifération de certaines espèces exotiques dans certains milieux qui pourraient être favorables au développement des moustiques. C'est le cas des nombreuses zones humides des paysages camarguais et des différents étangs. Cette étude a donc pu montrer les intérêts de favoriser la meilleure transparence écologique des infrastructures afin d'impacter le moins possible les pipistrelles mais n'a pas tenu compte de la diversité faunistique et floristique présente. Une autre approche permettrait de définir chacun des milieux et écosystèmes en analysant leurs fonctionnalités et les différents services qu'ils procurent.

3.3.3 *Prise en compte de l'intégralité des habitats et des espèces*

Ce modèle a permis d'analyser la connectivité des habitats pour les chiroptères et ainsi d'analyser en quoi les infrastructures de transports peuvent être transparentes pour cette espèce. Il a également été mis en relief les nombreux services rendus par les chiroptères qui pourraient être amputés. Cependant, notre terrain d'étude abrite une importante biodiversité et il semble indispensable de prendre en compte l'ensemble des habitats et des espèces présentes.

Tout d'abord, une telle approche permettrait, d'une part de pouvoir restaurer la transparence écologique des infrastructures de transport en fonction des espèces présentes et, d'autre part, d'identifier l'ensemble des services écosystémiques. Cela passerait par la définition de l'ensemble des milieux et écosystèmes (forestiers, prairiaux, aquatiques, pelousaires et humides) mais pourrait aller au delà en identifiant les habitats et les espèces.

Afin d'analyser la répartition des espèces et leurs exigences écologiques et environnementales, la méthode la plus précise nécessiterait de bonnes connaissances sur les exigences des espèces ainsi que des données de distribution encore trop insuffisantes. En effet, identifier de manière précise la répartition des espèces passerait par des observations de terrain, trop coûteuses en temps et en moyens [Store R. et Kangas J., 2001]. C'est donc pour faire face à cette difficulté qu'aujourd'hui de nombreux modèles de distribution prédictifs (en termes de distribution des espèces et de qualité des habitats) tendent à se développer. Dans la littérature anglo-saxonne, ils sont souvent appelés « *habitat suitability models* » faisant référence aux exigences écologiques d'une espèce envers son habitat [Gurnell J. et al., 2002 ; Decout S. et Luque S., 2010]. Ces modèles visent à analyser les liens fonctionnels entre le comportement de l'animal et les variables du milieu. Ils permettent également de générer la probabilité d'occurrence d'une espèce et les propriétés des différents éléments de l'habitat [Store R. et Kangas J., 2001 ; Decout S. et Luque S., 2010]. Ces méthodes ont montré leur efficacité scientifique mais également politique, c'est-à-dire pour la prise de décision. Cependant, elles requièrent un minimum de données d'observations afin de pouvoir être validées.

Les informations sur la répartition spatiale réelle des espèces est donc indispensable. Au delà des modèles de distribution, elles permettraient également de faire ressortir des spécificités spatiales qui caractériseraient l'ensemble des habitats. A partir d'une telle analyse sur un territoire donné et en fonction des récurrences spatiales, il serait possible d'identifier les

caractéristiques spatiales, environnementales ou encore climatiques favorables à la présence de chacune des espèces et d'extrapoler les résultats sur un territoire plus large. Ainsi, même si aucune de données de répartition n'est disponible sur un territoire, il serait possible de prédire la présence ou non d'habitats et d'espèces. Plus précisément, à travers une analyse cartographique, il serait possible de prédire quelles espèces l'on peut trouver dans tel ou tel milieu. Ces méthodes sont de plus en plus approfondies par de nombreux spécialistes. C'est le cas notamment de la LPO qui tend à mettre en place un outil qui pourrait s'appliquer sur l'ensemble du territoire français. Aux dernières nouvelles, les prédictions sont encore loin de la réalité mais pourraient d'ici quelques années être fiables et utilisables.

Dans notre cas, les données utilisées ont permis d'identifier le paysage et sont de plus disponibles sur de nombreux territoires :

- Corine Land Cover (2006) permet de qualifier l'occupation du sol et sera bientôt actualisée⁹. Elle est disponible pour toute la France ;
- le RPG (2010) identifie les cultures déclarées par les exploitants et est actualisé chaque année pour l'intégralité de la France ;
- la BD Topo, disponible sur l'ensemble du territoire français, est mis à jour chaque année mais est une base de données payante ce qui peut représenter une limite ;

Dans tous les cas une définition relativement précise de l'occupation d'un territoire en France est largement réalisable. À l'inverse, il existe trop peu de données d'observation pour définir la présence ou l'absence d'une espèce sur un endroit donné. Les données BIOTOPE (2012), qui était à notre disposition, ne couvrait pas l'intégralité du terrain d'étude. Par exemple, aucune donnée n'existait entre Salon-de-Provence et Saint-Martin-de-Crau. C'est donc pour cette raison qu'il a été impossible de mettre en place un modèle de distribution. Or, à partir des données d'occupation du sol et de méthodes d'extrapolation, il aurait été possible de prédire la présence des espèces et de pallier ce manque d'information.

⁹ La base de donnée Corine Land Cover est actualisée régulièrement afin d'analyser les changements en termes de l'occupation du sol. Actuellement en cours de traitement, elle devrait bientôt voir le jour afin la fin de l'année 2014.

Ainsi, une approche par l'espèce, telle que nous l'avons réalisée ici, présente la limite de ne pas considérer l'ensemble des espèces. Aujourd'hui, l'enjeu serait d'identifier la répartition de l'ensemble des habitats et espèces afin de pouvoir restaurer les continuités paysagères et ainsi favoriser de manière optimale la transparence écologique des infrastructures de transport. Cependant, une telle approche nécessiterait des données de répartition issues d'observations de terrain qui ne sont pas toujours réalisables car trop coûteuses. L'enjeu actuel est donc de développer des modèles de prédiction robustes qui limiteraient ces études de terrain. Par ailleurs, on a vu qu'une espèce peut avoir une influence sur d'autres espèces, l'une pouvant être la proie de l'autre ou inversement d'une part mais également en rendant des services qui permettent la présence de certaines espèces. À travers ces constats, certains auteurs tentent de mesurer les dynamiques de population notamment grâce à des modèles dynamiques de population spatialement explicite qui tiennent compte de la dimension fonctionnelle du paysage (systèmes multi-agents). Ils considèrent donc les dynamiques de population en termes de naissance mortalité, émigration et immigration et permettent ainsi d'analyser la connectivité en fonction des tendances spatio-temporelles de la population [Ovaskainen O. et Hanski I., 2003 ; Snäll T. et al., 2005]. Dans tous les cas, il semble difficile de mesurer l'ensemble des impacts provoqués par l'empreinte humaine sur la biodiversité et l'environnement ainsi que toutes les conséquences néfastes sur l'homme, engendrées par ces modifications. Favoriser la transparence des infrastructures de transports est donc essentiel et nécessite une meilleure connaissance des territoires en termes de répartition des espèces et de leurs habitats.

Conclusion

Malgré les nombreuses réglementations politiques et les multiples avancées scientifiques, les enjeux socio-économiques sont souvent mis au premier plan au détriment des enjeux environnementaux. Pourtant peu de nouveaux projets d'infrastructures de transport devraient voir le jour, faute de crédits. La requalification de l'existant pourrait permettre de rétablir la transparence écologique des infrastructures de transport. Pour le moment, ces dernières n'ont cessé de se multiplier fragmentant de plus en plus le territoire et favorisant ainsi l'impact sur la biodiversité. Aujourd'hui, la Trame Verte et Bleue, outil d'aménagement du territoire, vise à restaurer les continuités écologiques, préserver la biodiversité et diminuer la fragmentation et la vulnérabilité des habitats. L'intérêt est de faire coexister les réseaux de transport et écologique. À travers ces différents constats et parallèlement au programme ITTECOP, ce mémoire a analysé la transparence écologique des infrastructures de transport entre Salon-de-Provence et Arles.

Tout d'abord, l'identification des différents enjeux a montré l'importance de protéger la biodiversité de notre terrain d'étude et l'intérêt de restaurer les continuités écologiques. Notre étude s'est focalisée sur la pipistrelle en raison des nombreux enjeux de conservation qui y sont liés. En effet, c'est une espèce protégée sur le plan national (liste rouge des mammifères continentaux de France) et international (liste rouge européenne et mondiale). Sur les portions de routes entre Salon-de-Provence et Arles, c'est également celle qui est la plus touchée par les collisions avec les véhicules. À partir de ces constats, il est apparu nécessaire d'analyser la transparence écologique des infrastructures de transport pour la pipistrelle. Ainsi, après avoir défini le paysage tel que le perçoit cette espèce et identifier ses habitats potentiels, un modèle basé sur la théorie des graphes a été mis en place. Différentes métriques de connectivité ont pu être calculées.

Ce modèle a permis de mettre en exergue les fonctionnalités du paysage qui ont été impactées et les espaces où il pourrait être important de rétablir des connexions écologiques. Le but est de rétablir une certaine transparence écologique des infrastructures de transport. Comme dans de nombreuses études, le jumelage n'a pas été analysé en tant que « concept » mais à travers l'impact d'une infrastructure. Différentes zones à enjeux ont toutefois pu être traitées.

Le Rhône est un important corridor journalier et migratoire et sa ripisylve abrite une importante population de pipistrelles. Ils se placent comme des espaces prioritaires qu'il est indispensable de protéger. Par ailleurs, le terrain d'étude est principalement composé de terrain agricole et peu d'espaces naturels existent encore. La protection des forêts restantes est donc incontournable et de nouvelles plantations de haies ou de bosquets pourraient être préconisées via des mesures agroenvironnementales. Enfin, aujourd'hui, l'A 54, la RN 113 et la voie ferrée impactent la biodiversité et les continuités écologiques. Des mesures d'aménagements du territoire pourraient rétablir certaines connexions et favoriser la transparence écologique de ces infrastructures de transports. Pour cela, il est essentiel de mettre en place des buses (ou bien d'utiliser les tunnels du réseau hydrographique déjà existants) et d'inciter les pipistrelles à les utiliser en les plaçant dans le prolongement des haies, principal corridor pour cette espèce. Cela permettrait de limiter au maximum les collisions, faciliterait l'accès à certains terrains de chasse et favoriserait les échanges entre les populations de pipistrelles.

Figure 12 Cohabiter avec les chauves souris (source : La dépêche de Garenne, GEPMA, 2011)



Ainsi, il est vrai que dans certains continents les chiroptères représentent un réel danger pour l'Homme. En Amérique du Sud par exemple, elles sont un important réservoir pour la rage et peuvent transmettre cette maladie par morsure [Sara D.M.J., 2002]. Cependant, en Europe elles

sont inoffensives pour l'Homme et peuvent même lui rendre de nombreux services en chassant les insectes. Il faut donc cohabiter avec elles (Figure 12) et plus globalement (ré)apprendre à cohabiter avec l'ensemble des espèces animales et végétales qui nous entourent. La biodiversité doit continuer à être bénéfique pour l'Homme et l'artificialisation des services écosystémiques ne doit pas se banaliser, d'autant plus que les coûts de ces pratiques ne sont pas négligeables.

Références

Bibliographie

1. AGULHON L., COULET E., CHERAIN Y., DERVIEUX A., MATHEVET R., SANDOZ A., ROUSSEAU C., CROMBE O., MARTIN A., LUTARD C., ARNASSANT S., NAVARRO O., BRIFFAUT J.-C., COSPEN M., CARNINO-BIDART M., IVANES C., OLIVRY D. & VIANET R. (2001). *Occupation du sol en Camargue : cartographie du territoire du Parc Naturel Régional de Camargue en 2001 et évolution depuis 1991*. Parc Naturel Régional de Camargue, 64 p.
2. ANDRÉ P., DELISLE C.E. & REVÉRET J.P.. (2003). L'évaluation des impacts sur l'environnement. *Presses internationales polytechniques*, Québec, 519 p.
3. ARIAS-ESTÉVEZ M., LOPEZ-PERIAGO E., MARTINEZ-CARBALLO E., SIMAL-GANDARA J., MEJUTO J.C. & GARCIA-RIO L. (2007). The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, vol.124, n°4, pp. 247-260.
4. ARTHUR L. & LEMAIRE M. (1999). *Les chauves-souris maîtresses de la nuit*. Delachaux et Niestlé, 224 p.
5. AVON C. & BERGÈS L. (2013). *Outils pour l'analyse de la connectivité des habitats*. Rapport dans le cadre du programme Irstea/DEB Diacofo, 33 p.
6. AWADE M., BOSCOLO D. & METZGER J.P. (2012). Using binary and probabilistic habitat availability indices derived from graph theory to model bird occurrence in fragmented forests. *Landscape Ecology*, n°27, pp. 185-198.
7. BACH L., BURKHARDT P. & LIMPENS H. (2004). Tunnels as a possibility to connect bat habitats. *Mammalia*, n° 68, pp. 411-420.
8. BALVANERA P., KREMEN C. & MARTINEZ M. (2005). Applying community structure analysis to ecosystem function: examples from pollination and carbon storage. *Ecological Applications*, n°15, pp. 360-375.
9. BARANYI G., SAURA S., PODANI J. & JORDAN F. (2011). Contribution of habitat patches to network connectivity: redundancy and uniqueness of topological indices. *Ecol. Indicators*, n°11, pp. 1301-1310.
10. BEAUGITTE L. (2010). Graphes, réseaux, réseaux sociaux : vocabulaire et notation. *Groupe fmr*, 7 p.

11. BEKETOV M.A., KEFFORD B.J., SCHÄFER R.B. & LIESS M. (2013). Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol.110, n°27, pp. 11039-11043.
12. BENNETT A.F. (1991). Roads, roadsides and wildlife conservation: a review. In SAUNDERS D.A. & HOBBS R.J. (eds). *Nature conservation 2 : the role of corridors*. Surrey Beatty & sons, Chipping Norton, Australia, pp. 99-118.
13. BERGER A. & IFEN (2006). Les impacts du réseau routier sur l'environnement. *Pressions*, n°14, 4 p.
14. BERNARD P., RICHART F. & LANIESSE T. (2012). *Étude de l'impact des infrastructures sur la fragmentation de la Trame Verte et Bleue*. Note méthodologique du PNR de la Narbonnaise en Méditerranée, novembre 2012, 16 p.
15. BETTS M. & GREATER FUNDY ECOSYSTEM RESEARCH GROUP. (2000). *In search of ecological relevancy: A review of landscape fragmentation metrics and their application for the Fundy Model Forest Sussex*. New Brunswick: Natural Resources, Canada, 38 p.
16. BLOT E., PIQUENOT S., CABON B., BELLON S., JOANNY M., CHERAIN Y., COULET E., VANDREWALLE P., TARIS J.-P., TAMISIER A., ARPE, DIREN PACA, SOCIÉTÉ NATIONALE DE PROTECTION DE LA NATURE, CNRS, DDAF BOUCHES-DU-RHÔNE, STATION BIOLOGIQUE TOUR DU VALAT (2012). *Le parc naturel régional de Camargue : occupation du sol en 1991 et évolution depuis 1970*. Agence Régionale pour l'Environnement et PNR de Camargue, 91 p.
17. BIELSA S. & PINEAU C. (2007). *Inventory and typology of fauna passages on French transport infrastructures*. University of California, Davis, 11 p.
18. BISSONNETTE J.A. & ROSA S.A. (2009). Road zone effects in small-mammals communities. *Ecology and Society*, 14(1) : 27, 15 p.
19. BOONMAN M. (2011). Factors determining the use of culverts underneath highways and railway tracks by bats in lowland areas. *Lutra*, n°54, pp. 3-16.
20. BOUGHEY K.L., LAKE I.R., HAYSOM K.A. & DOLMAN P.M. (2001). Effects of landscape-scale broadleaved woodland configuration and extent on roost location for six bat species across the UK. *Biological Conservation*, n°144, pp. 2300-2310.
21. BRIGHT J.A., MORRIS T., WINSPEAR R.J., GREAT BRITAIN & ROYAL SOCIETY FOR THE PROTECTION OF BIRDS (2008). A review of indirect effects of pesticides on birds and mitigating land-management practices. *Sandy : RSPB, Research Report*, n°28, 66 p.

22. BULLOCK A. & ACREMAN M. (2003). The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*, n°7, vol. 3, pp. 358-389.
23. BUNN A.G., URBAN D.L. & KEITT T.H. (2000). Landscape connectivity: a conservation application of graph theory. *Journal of Environmental Management*, vol. 2, n°10, pp. 265-278.
24. BUREL F. & BAUDRY J. (1999). *Écologie du paysage: Concepts, méthodes et applications*. Paris, Techniques & Documentation.
25. CARLSON A. & HARTMAN G. (2001). Tropical forest fragmentation and nest predation – an experimental study in an Eastern Arc montane forest, Tanzania. *Biodivers. Conserv.*, n°10, pp. 1077-1085.
26. CEREMA, EX-CETE MÉDITERRANÉE (2012). Continuité autoroutière au droit d'Arles - Dossier d'avant projet. *Diagnostic préalable*, 35 p.
27. CEREMA, EX-CETE MÉDITERRANÉE (2013). Diagnostic de la transparence écologique du réseau routier national non concédé de PACA et propositions de travaux d'amélioration. *Rapport CETE Méditerranée*, septembre 2013, 81 p.
28. CEREMA, EX-CETE, GERBEAUD MAULIN F. & LONG M. (2008). La fragmentation des milieux naturels – état de l'art en matière d'évaluation de la fragmentation des milieux naturels. *Rapport DIREN PACA*, Avril 2008, 73 p.
29. CEREMA, EX-SETRA (2000). *Fragmentation de l'habitat due aux infrastructures de transport : état de l'art*. Rapport de la France, COST-Transport, Action 341, 196 p.
30. CEREMA, EX-SETRA, EX-CETE DE L'EST, EX-CETE NORMANDIE CENTRE (2009). Chiroptères et infrastructures de transports terrestres : Menaces et actions de préservation. *Économie, Environnement, Conception*, n° 91, 22 p.
31. CGDD (2011). Coût des principales pollutions agricoles de l'eau. *Études & documents*, n°52, 34 p.
32. CGDD (2014). 10 indicateurs clés de l'environnement. *Repères*, édition 2014, 2 p.
33. CHAPPELKA A.H. (2001). *Impacts of air pollution on forest ecosystems*. Amsterdam: Elsevier.
34. CHEVASSUS-AU-LOUIS B. (2006). Un nouveau regard sur la biodiversité du vivant. *Responsabilité & environnement*, n°44, pp. 7-16.
35. COLLINGHAM Y.C. & HUNTLEY B. (2000). Impacts of habitat fragmentation and patch size upon migration rates. *Ecol. Appl.*, n°10, pp. 131-144.

36. CORK S., GEOFF G., AMPT P., MAYNARD S., ROWLAND P., OLIPHANT R., REEDER L. & STEPHENS L. (2012). *Discussion paper on ecosystem services for the Department of Agriculture, Fisheries and Forestry: Final report*. Weston, A.C.T. : Australia 21, 159 p.
37. CORMIER L., DE LAJARTRE A.B. & CARCAUD N. (2010). La planification des trames vertes, du global au local : réalités et limites. *Cybergeog : European Journal of Geography, Aménagement, Urbanisme*, doc. 504.
38. DEBRAY A. (2011). La notion de réseau écologique en France : construction scientifique, appropriation par les politiques publiques et traduction territoriale. *Vertigo, la revue électronique des sciences de l'environnement*, Débats et Perspectives.
39. DECOUT S. & LUQUE S. (2010). Ecotram – Comparaison de méthodes pour l'application de la Trame Verte et Bleue en Région Rhône-Alpes : Approche intégrée de diagnostic de connectivité appliqué aux amphibiens. *Rapport d'étude CEMAGREF*, 56 p.
40. DI GIULO M., TOBIAS S. & HOLDEREGGER R. (2007). Fragmentation du paysage dans les espaces périurbains : que savons-nous de ses effets sur la nature et sur l'homme ? Notice pour le praticien, n°42, Bimensdorf : institut fédéral de recherches WSL, 8 p.
41. DIAZ J.A., CARBONELL R., VIRGOS E., SANTOS T. & TELLERIA J.L. (2000). Effects of forest fragmentation on the distribution of the lizard *Psammodros algirus*. *Anim. Conserv.*, n° 3, pp. 235-240.
42. DIREN & DDE (2007). *L'atlas des paysages de Bouches-du-Rhône*.
43. DUPRÉ R. (2009). Les bords de routes et les voies ferrées en région Centre, couloirs de propagation et zones refuges pour certaines espèces végétales. *Symbioses*, n°24, pp. 45-49.
44. ECONAT & CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ISÈRE (2001). *Projet de réseau écologique départemental de l'Isère*.
45. EIGENBORG F., HECNAR S.J. & FAHRIG L. (2009). Quantifying the road-effect zone: threshold effects of a motorway on anuran populations in Ontario Canada. *Ecology and Society*, 14 (1) : 24, 18 p.
46. ELBAZ A., CLAVEL J., RATHOUZ P.J., MOISAN F., GALANAUD J.P., DELEMOTTE B., ALPÉROVITCH A. & TZOURIO C. (2009). Professional exposure to pesticides and Parkinson's disease. *Annals of Neurology*, vol. 66, n°4, pp.494-504.

47. ESTRADA E. & BODIN O. (2008). Using network centrality measures to manage landscape connectivity. *Ecological Applications*, n°18, pp. 1810-1825.
48. EULER L. (1741). Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis. *Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae* 8, pp. 128-140.
49. EWEL J.J., MAZZARINO M.J. & BERISH C.W. (1991). Tropical soil fertility changes under monocultures and successional communities of different structure. *Ecological Applications*, n°1, pp. 289-302.
50. FAHRIG L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, n°34, pp. 487-515.
51. FALL A., FORTIN M.J., MANSEAU M. & O'BRIEN D. (2007). Spatial graphs: principles and applications for habitat connectivity. *Ecosystems*, n°10, pp. 448-461.
52. FLOWERDEW R., MANLEY D.J. & SABEL C.E. (2008). Neighbourhood effects on health: Does it matter where you draw the boundaries? *Social Science & Medicine*, 2008, 66, n°6, pp. 1241-1255.
53. FOLTETE J.-C., AFONSO E., CLAUZEL C., GIRARDET X., GIRAUDOUX P., TOURNANT P. & VUIDEL G. (2011). *Infrastructures de transports terrestres, écosystèmes et paysages*. Rapport final du programme de recherche ITTECOP, 62 p.
54. FOLTETE J.-C., CLAUZEL C. & VUIDEL G. (2012). A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environmental Modelling and Software*, n°38, pp. 316-327.
55. FOLTETE J.-C., CLAUZEL C., GIRARDET X., TOURNANT P. & VUIDEL G. (2012). La modélisation des réseaux écologiques par les graphes paysagers. *Revue internationale de géomatique*, vol. 22, n°4, pp. 641-658.
56. FORMAN R.T.T., SPERLING D., BISSONNETTE J.A., CLEVINGER A.P., CUTSHALL C.D., DALE V.H., FAHRIG L., FRANCE R., GOLDMAN C.R., HEANUE K., JONES J.A., SWANSON F.J., TURRENTINE T., WINTER T.C. (2003). *Road Ecology: Science and Solutions*. Island Press, Washington D.C.
57. FOURÈS J.-M. (2014). A two-scale approach towards a multi-agent based model to predict High-Speed-Line (HSL) diffuse impacts on biodiversity. Transport Research Arena, Paris, 10 p.
58. FOURNIER J.-C. (2006). *Théories de graphes et applications : avec exercices et problèmes*. Hermès Science Publications, Paris, 283 p.

59. GALPERN P., MANSEAU M. & FALL A. (2011). Patch-based graphs of landscape connectivity: a guide to construction, analysis and application for conservation. *Biological Conservation*, vol. 144, pp. 44-55.
60. GARCIA-GONZALEZ C., CAMPO D., POLA I.G. & GARCIA-VAZQUEZ E. (2012). Rural road networks as barriers to gene flow for amphibians: species-dependent mitigation by traffic calming. *Landscape and Urban Planning*, n°104, vol. 2, pp. 171-180.
61. GEE K. & BURKHARD B. (2010). Cultural ecosystem services in the context of offshore wind farming: a case study from the west coast of Schleswig-Holstein. *Ecological Complexity*, n°7, vol. 3, pp. 349-358.
62. GORDON L.J., FINLAYSON C.M. & FALKENMARK M. (2010). Managing water in agriculture for food production and other ecosystem services. *Agricultural Water Management*, n° 97, pp. 512-519.
63. GUINARD E., JULLIARD R. & BARBRAUD C. (2012). Motorways and bird traffic casualties: carcasses surveys and scavenging bias. *Biological Conservation*, n°147, pp. 40-51.
64. GUISAN A. & ZIMMERMAN N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, n°135, pp. 147-186.
65. GURNELL J., CLARK M.J., LURZ P.W.W., SHIRLEY M.D.F. & RUSHTON S.P. (2002). Conserving red squirrels (*Sciurus vulgaris*) : mapping and forecasting habitat suitability using Geographic Information Systems approach. *Biol Conserv*, n°105, pp. 53-64.
66. HAIG A.R., MATTHES U. & LARSON D.W. (2000). Effects of natural habitat fragmentation on the species richness, diversity, and composition of cliff vegetation. *Can. J. Bot.*, n°78, pp. 786-797.
67. HUBERT-VINCENT F. (2007). *Diversité génétique et adaptation des espèces aquatiques en milieu anthropisé*. Nantes : Ifremer, 36 p.
68. HUMMER J.E., RASDORF W., FINDLEY D.J., ZEGER C.V. & SUNDSTROM C.A. (2010). Curve collisions: Road and collisions characteristics and countermeasures. *Journal of Transportation Safety & Security*, n°2, vol. 3, pp. 203-220.
69. JAEGER J.A.G., BOWMAN J., BRENNAN J., FAHRIG L., BERT D., BOUCHARD J., CHARBONNEAU N., FRANK K., GRUBERT B. & TLUK VON TOSCHANOWITZ K. (2005). Predicting when animal populations are at risk from roads: an interactive model of road avoidance behavior. *Ecological Modeling*, n°185, pp. 329-348.
70. KREMER A. (2000). Changements climatiques et diversité génétique. *Revue Forestière Française*, vol. 52, numéro spécial 2, pp. 91-97.

71. LAITA A., KOTIAHO J.S. & MÖNKKÖNEN M. (2011). Graph-theoretic connectivity measures: what do they tell us about connectivity? *Landscape Ecology*, vol. 26, pp. 951-967.
72. MCARTHUR R.H. & WILSON E.O. (1967). *The theory of island biogeography*. Princeton, N.J. : Princeton University Press. 203 p.
73. MCINNIS R.J. (2012). *Discussion paper of Cities and Ecosystem services*. Expert Group Meeting, Landscape Fragmentation and City-Region Planning, 13 p.
74. MENEGAUX F., BARUCHEL A., BERTRAND Y., LESCOEUR B., NELKEN B., SOMMELET D. & CLAVEL J. (2006). Household exposure to pesticides and risk of childhood acute leukaemia. *Occup Environ Med*, vol. 63, n°2, pp. 131-134.
75. MEHR M., BRANDL R., HOTHORN T., DZIOCK F., FORSTER B. & MULLER J. (2011). Land use is more important than climate for species richness and composition of bat assemblages on regional scale. *Mammalian Biology*, n°76, pp. 451-460.
76. MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (2005). *Current state and trends assessment*. Washington D.C., Island Press.
77. MINOR E.S. & LOOKINGBILL T.R. (2010). A multiscale network analysis of protected-area: connectivity for mammals in the United States. *Conservation Biology*, vol. 24, n°6, pp. 1549-1558.
78. MINOR E.S. & URBAN D.L. (2007). A graph theory framework for evaluating landscape connectivity and conservation planning. *Conservation Biology*, vol. 22, n°2, pp. 297-307.
79. MITSCH W.J. & GOSSELINK J.G. (2000). The values of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological Economics*, n°35, pp. 25-33.
80. MORA C., TITTENSOR D.P., ADL S., SIMPSON A.G.B. & WORM B. (2011). How many species are there on earth and in the ocean? *PLoS Biology*, vol. 8, n°9, 8 p.
81. MORELLE K., LEHAIRE F. & LEJEUNE P. (2013). Spatio-temporal patterns of wildlife-vehicle collisions in a region with a high-density road network. *Nature Conservation*, n°5, pp. 53-73.
82. NEEL M.C. (2008). Patch connectivity and genetic diversity conservation in the federally endangered and narrowly endemic plant species *Astragalus albens* (Fabaceae). *Biol. Conservation*, n°141, pp. 938-955.
83. OLIVEAU S. (2010). Autocorrélation spatiale : leçons du changement d'échelle. *L'espace Géographique*, 01/2010, vol. 39, pp.51-64.

84. ORTEGA Y.K. & CAPEN D.E. (1999). Effects of forest roads on habitat quality for Ovenbirds in a forested landscape. *Auk*, vol. 116, n°4, pp. 937-946.
85. OVASKAINEN O. & HANSKI I. (2003). Metapopulation theory for fragmented landscapes. *Theoretical Population Biology*, n°64, pp. 119-127.
86. PASCUAL-HORTAL L. & SAURA S. (2006). Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, n°21, pp. 959-967.
87. PÉTERI R., CELLE J. & RANCHIN T. (2003). *Contours actifs et analyse multirésolution pour l'extraction de réseaux de rues à partir d'images satellites*. In Congrès Francophone de Vision par Ordinateur (ORASIS'03), Gérardmer, p. 393-401.
88. RAYFIELD B., FORTIN M.-J. & FALL A. (2011). Connectivity for conservations: a framework to classify network measures. *Ecology*, vol. 92, pp. 847-858.
89. RICO A., KINDLMANN P. & SEDLACEK F. (2007). Barrier effects of roads on movements of small mammals. *Folia Zoologica*, 56(1), pp. 1-12.
90. RICOTTA C., STANISCI A., AVENA G.C. & BLASI C. (2000). Quantifying the network connectivity of landscape mosaics: a graph-theoretical approach. *Community Ecology*, vol.1, n°1, pp. 89-94.
91. RUSSELL A.L., BUTCHKOSKI C.M., SAIDAK L. & MCCRAKEN G.F. (2009). Road-killed bats, highway design, and the commuting ecology of bats. *Engangered Species Research* n°8, pp. 49-60.
92. RUTLEDGE D.T. (2003). Landscape indices as measures of the effects of fragmentation: Can pattern reflect process? *Doc Science Internal Series*, n° 98, Wellington, New Zealand, Dept. of Conservation, 27p.
93. SARA D.M.J. (2002). *Chauves-souris et zoonose*. Thèse de doctorat vétérinaire, Faculté de médecine de Créteil, 120 p.
94. SAUNDERS D.A., HOBBS R.J. & MARGULES C.R. (1991). Biological consequences of ecosystem fragmentation: a review. *Conervation Biology*, n°1, vol. 5, pp. 18-32.
95. SAURA S. & PASCUAL-HORTA L. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, n°83, pp. 91-103.
96. SAURA S. ET TORNÉ J. (2009). Conefor Sensinode 2.2 : A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling & Software*, n°24, pp. 135-139.

97. SCHOBER W. & GRIMMBERGER E. (1991). *Guide des chauves-souris d'Europe. Biologie, identification, protection*. Ed. : Guide Nature, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel, Paris, 225 p.
98. SEILER A. (2005). Predicting locations of moose-vehicle collisions in Sweden. *Journal of Applied Ecology*, n°42, pp. 371-382.
99. SÉTRA, CETE DE L'EST, CETE NORMANDIE CENTRE, CETE NORD PICARDIE, CETE MÉDITERRANÉE, CETE DE LYON, CETE DU SUD OUEST & CGDD (2011). Infrastructures de transport, biodiversité et territoire : l'apport de l'écologie du territoire. *Les notes d'informations du Sétra*, Sétra, décembre 2011, 29 p.
100. SHEPARD D.B., KUHNS A.R., DRESLIK M.J. & PHILIPS C.A. (2008). Roads as barriers to animal movement in fragmented landscapes. *Animal Conservation*, n°11, vol. 4, pp. 288-296.
101. SNÄLL T., PENNANEN J., KIVISTÖ L. & HANSKI I. (2005). Modelling epiphyte metapopulation dynamics in a dynamic forest landscape. *Oikos*, n°109, pp. 209-222.
102. SOILLE P. & VOGT P. (2009). Morphological segmentation of binary patterns. *Pattern Recognition Letters*, n°30, pp. 456-459.
103. SPURR S.H. (1948). *Aerial photography*. In FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED STATES (1948). *Forest resources of the world*. Washington D.C., *Unasylva*, vol. 2, n°4.
104. STORE R. & KANGAS J. (2001). Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape Urban Planning*, n°55, pp. 79-93.
105. TAYLOR P., FAHRIG L. & WITH K.A. (2006). Landscape connectivity: a return to basics. In: CROOKS K.R. & SANJAYAN M.A. (2006). *Connectivity conservation*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 29-43.
106. TOURNANT L. (2014). *Impact du paysage sur la distribution spatiale et génétique des colonies de petits rhinolophes*. Thèse de doctorat, Université de Franche Comté, 214 p.
107. THUNDIYIL J.G., STÖBER J., BESBELLI N. & PRONCZUK J. (2008). Acute pesticide poisoning: a proposed classification tool. *World Health Organization*, n°86, 8 p.
108. URBAN D.L. & KEITT T.H. (2001). Landscape connectivity: a graph theoretic approach. *Ecology*, vol.82, n°82, pp.1205-1218.

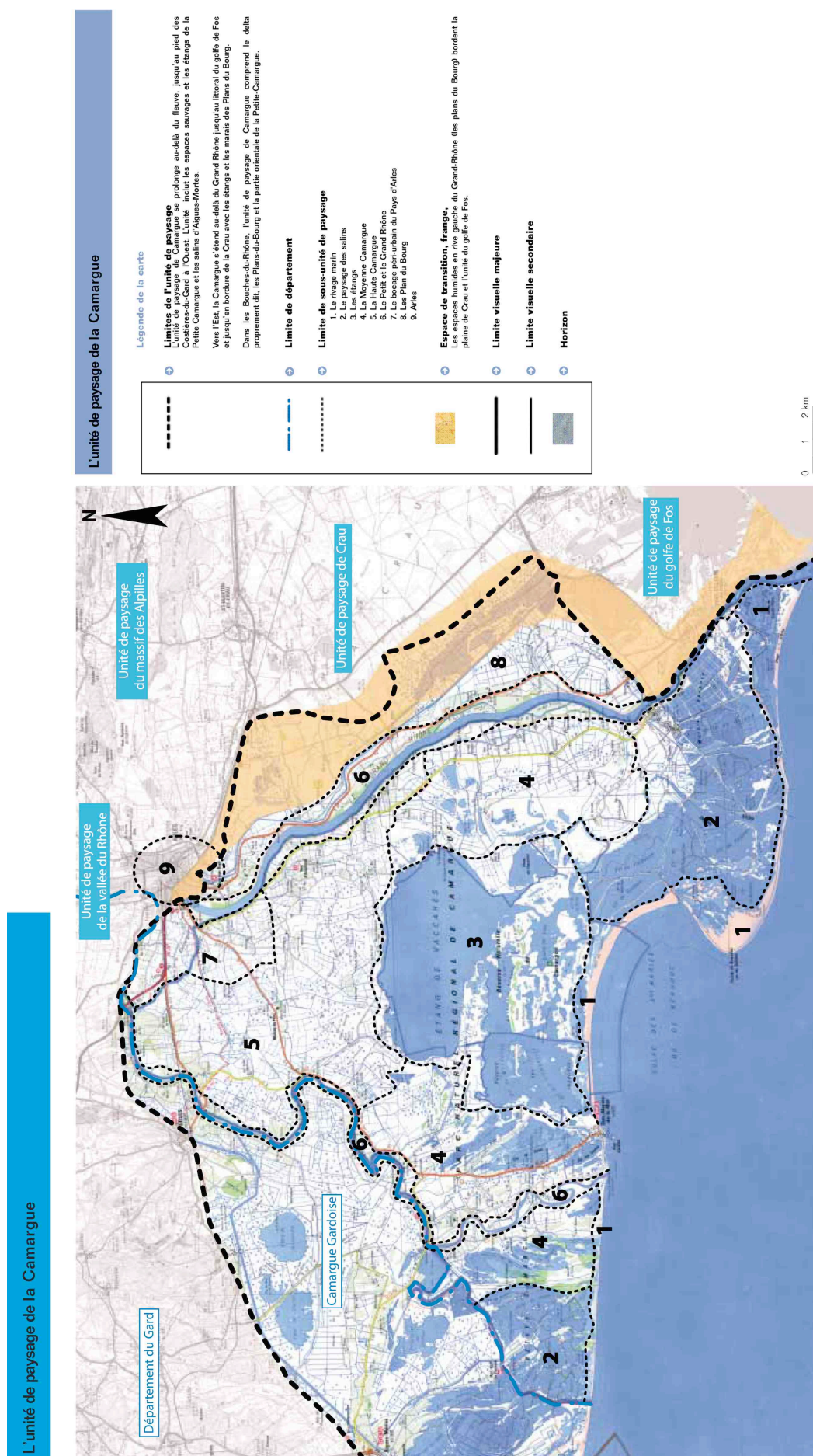
109. URBAN D.L., MINOR E.S., TREML E.A. & SCHICK R.S. (2009). Graph models of land mosaics. *Ecology letters*, vol. 12, n°3, pp. 260-273.
110. VOGT P., RIITERS K.H., IWANOWSKI M., ESTREGUIL C., KOZAK J. & SOILLE P. (2007). Mapping landscape corridors. *Ecological Indicators*, n°7, pp. 481-488.
111. VOGT P., RIITERS K.H., IWANOWSKI M., ESTREGUIL C., KOZAK J., WADE T.G. & WICKHAM J.D. (2007). Mapping spatial patterns with morphological image processing. *Landscape Ecology*, n°22, pp. 171-177.
112. ZURCHER A.A., SPARKS D.W. & BENNETT V.J. (2010). Why the bat did not cross the road? *Acta chiropterologica*, n°12, pp. 337-340.

Sitographie

1. <http://www.1tourdhorizon.com>
2. <http://www.biotope.fr>
3. <http://www.camargueenvironnement.com>
4. <http://www.cerema.fr>
5. <http://www.cete-mediterranee.fr>
6. <http://www.cg13.fr>
7. <http://www.corif.net>
8. <http://www.developpement-durable.gouv.fr>
9. <http://www.elodiephilippe.fr>
10. <http://www.faune-paca.org>
11. <http://www.gcprovence.org>
12. <http://glcf.umd.edu>
13. <http://www.ign.fr>
14. <http://inpn.mnhn.fr>
15. <http://www.inra.fr>
16. <http://www.ittecop.fr>
17. <http://www.ledeveloppementdurable.fr>
18. <http://www.life+chiromed.fr>
19. <http://www.lpo.fr>
20. <http://www.onf.fr>
21. <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr>
22. <http://www.silene.eu>
23. <http://thema.univ-fcomte.fr/productions/graphab/fr-home.html>
24. <http://www.trameverteetbleue.fr>

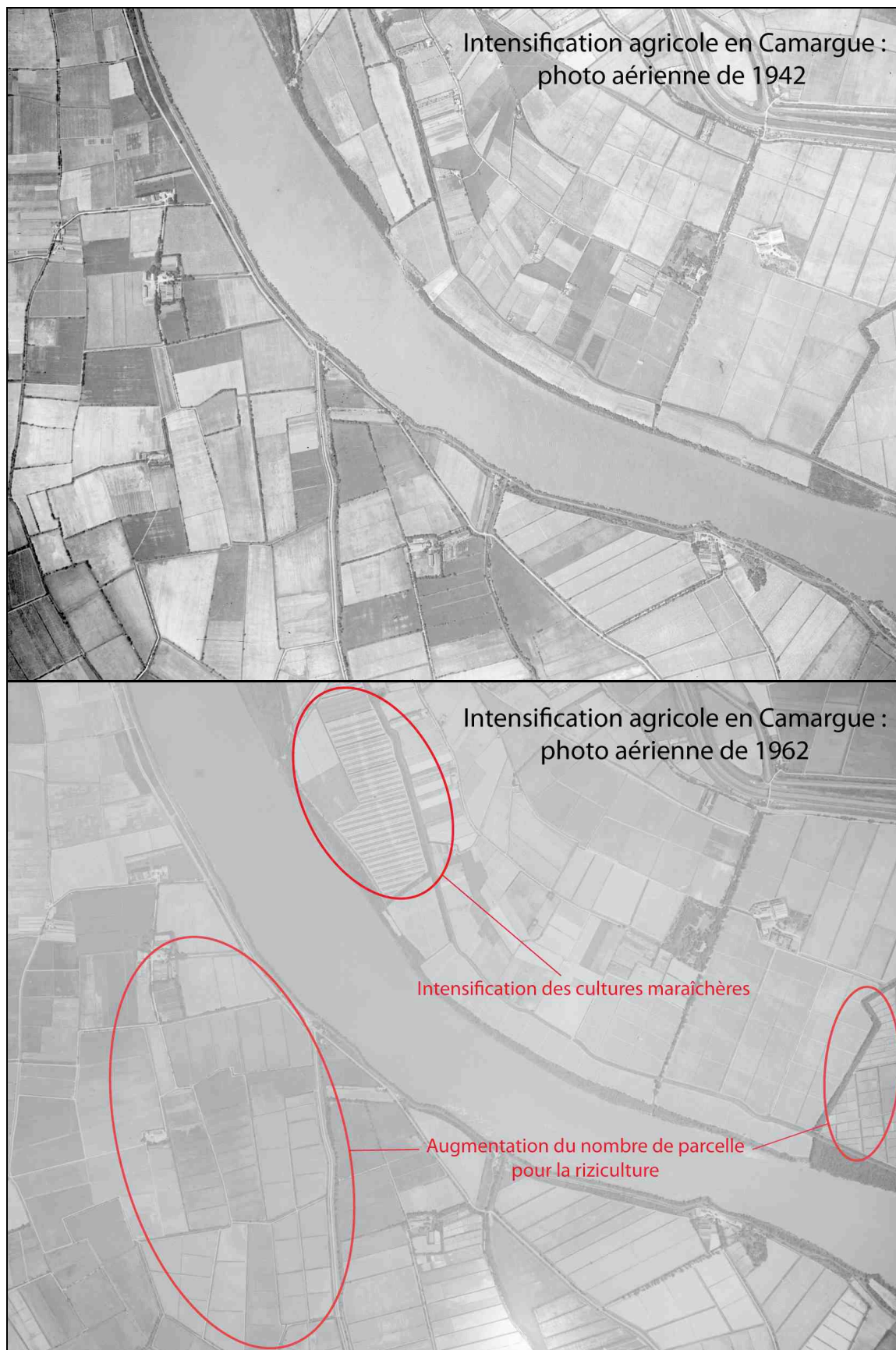
Annexes

Annexe 1 Les unités paysagères de la Camargue en 2007 (source : DDE & DIREN, 2007)



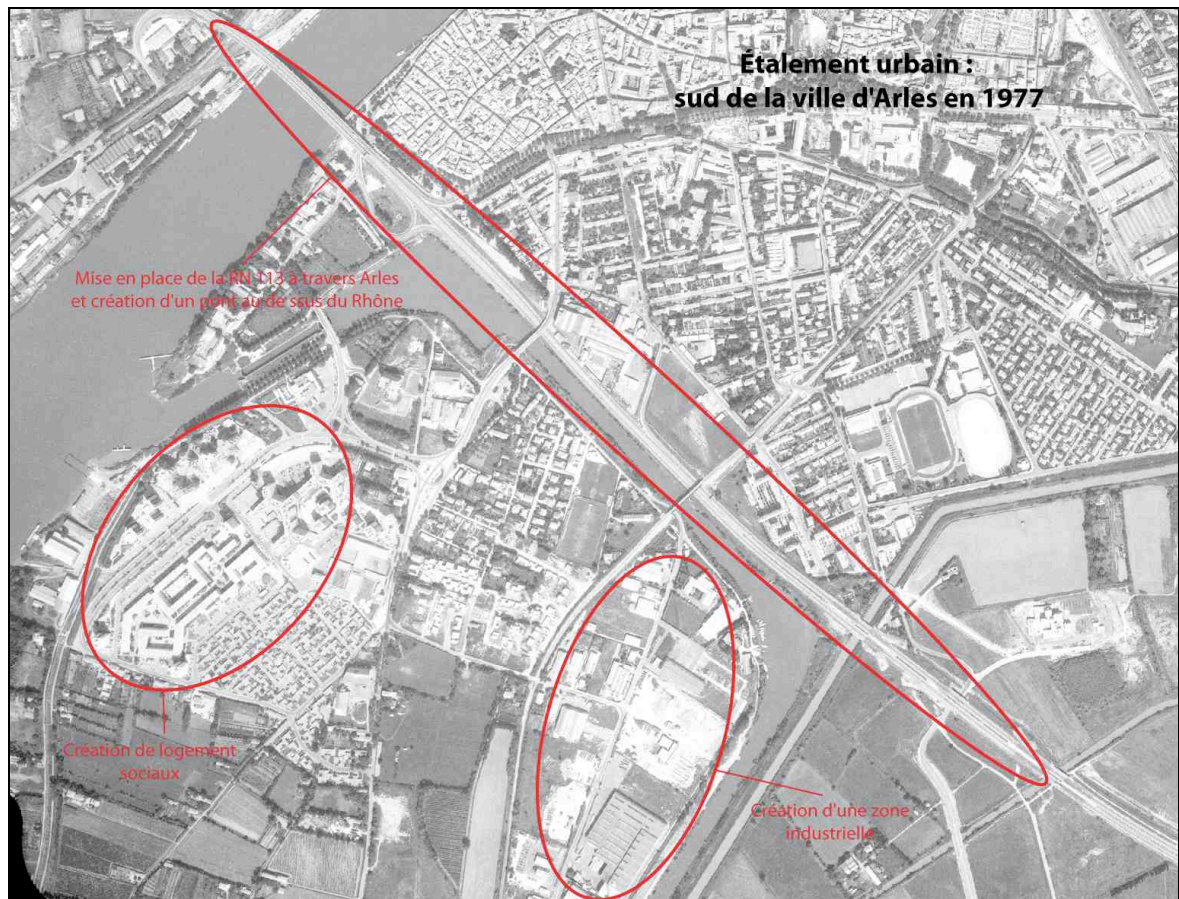


Annexe 3 Intensification des activités agricoles en Camargue

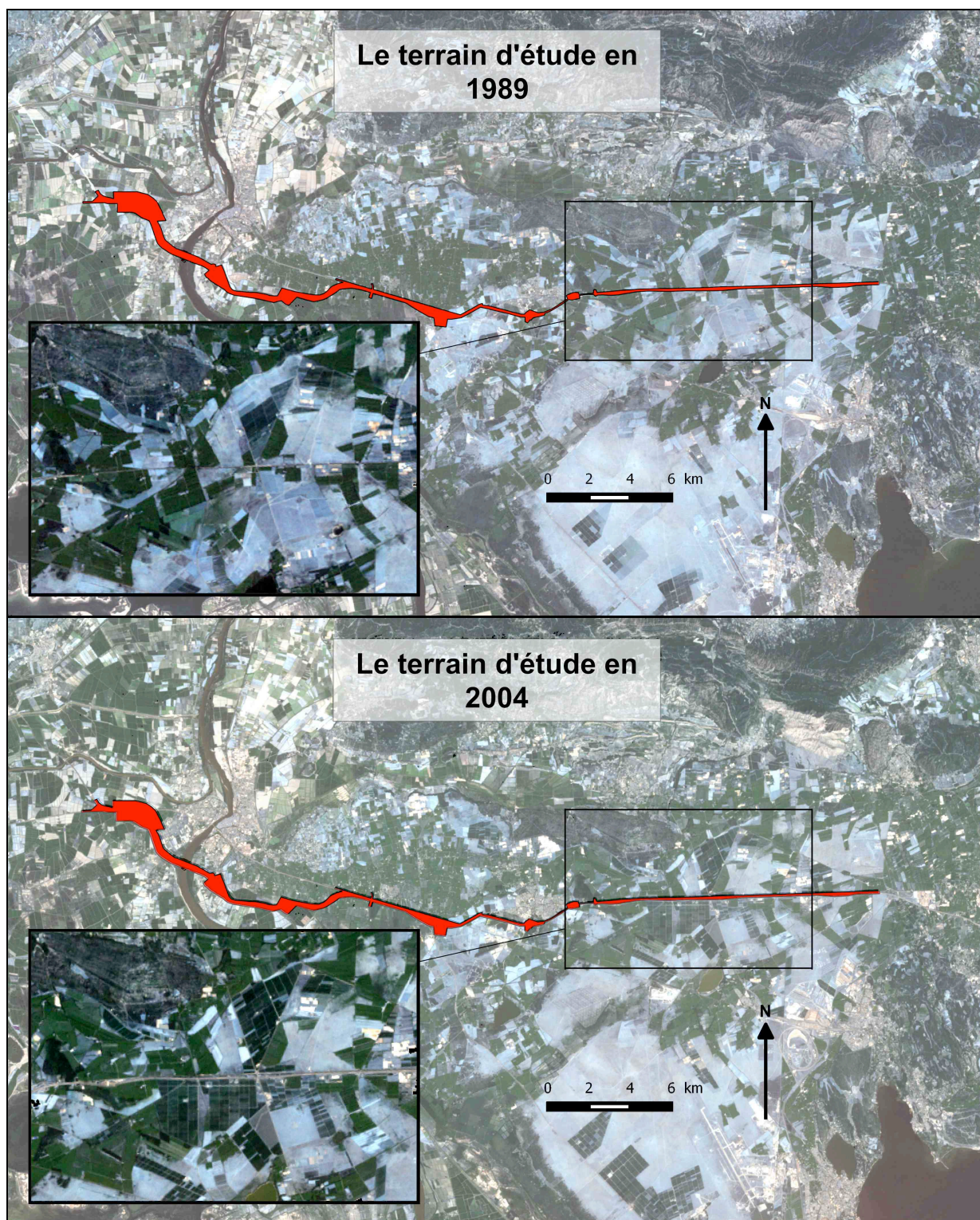


Annexe 4 Étalement urbain de la ville d'Arles





Annexe 5 Images satellites : apparition de la portion de l'A54 entre Salon de Provence et Saint-Martin-de-Crau

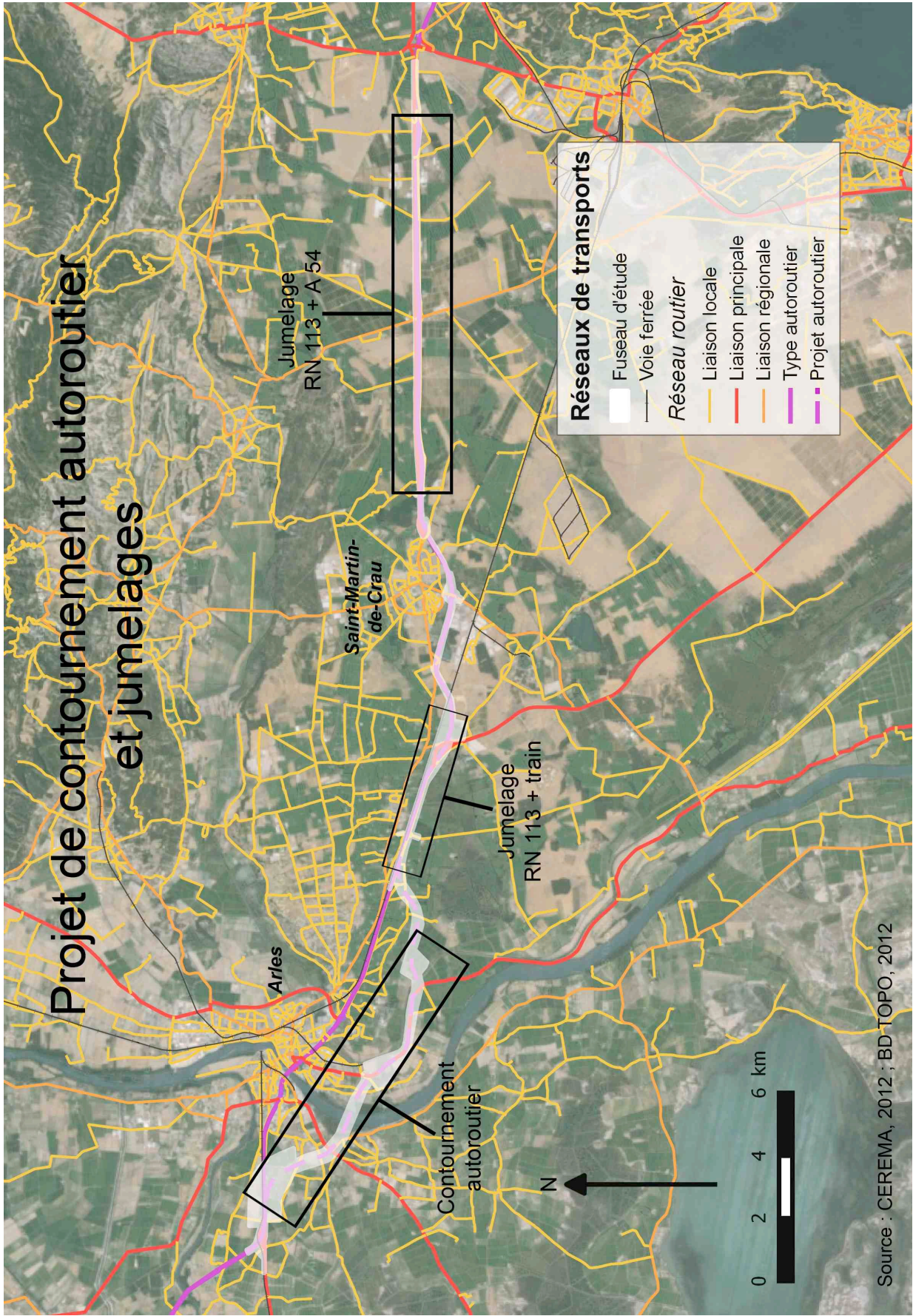


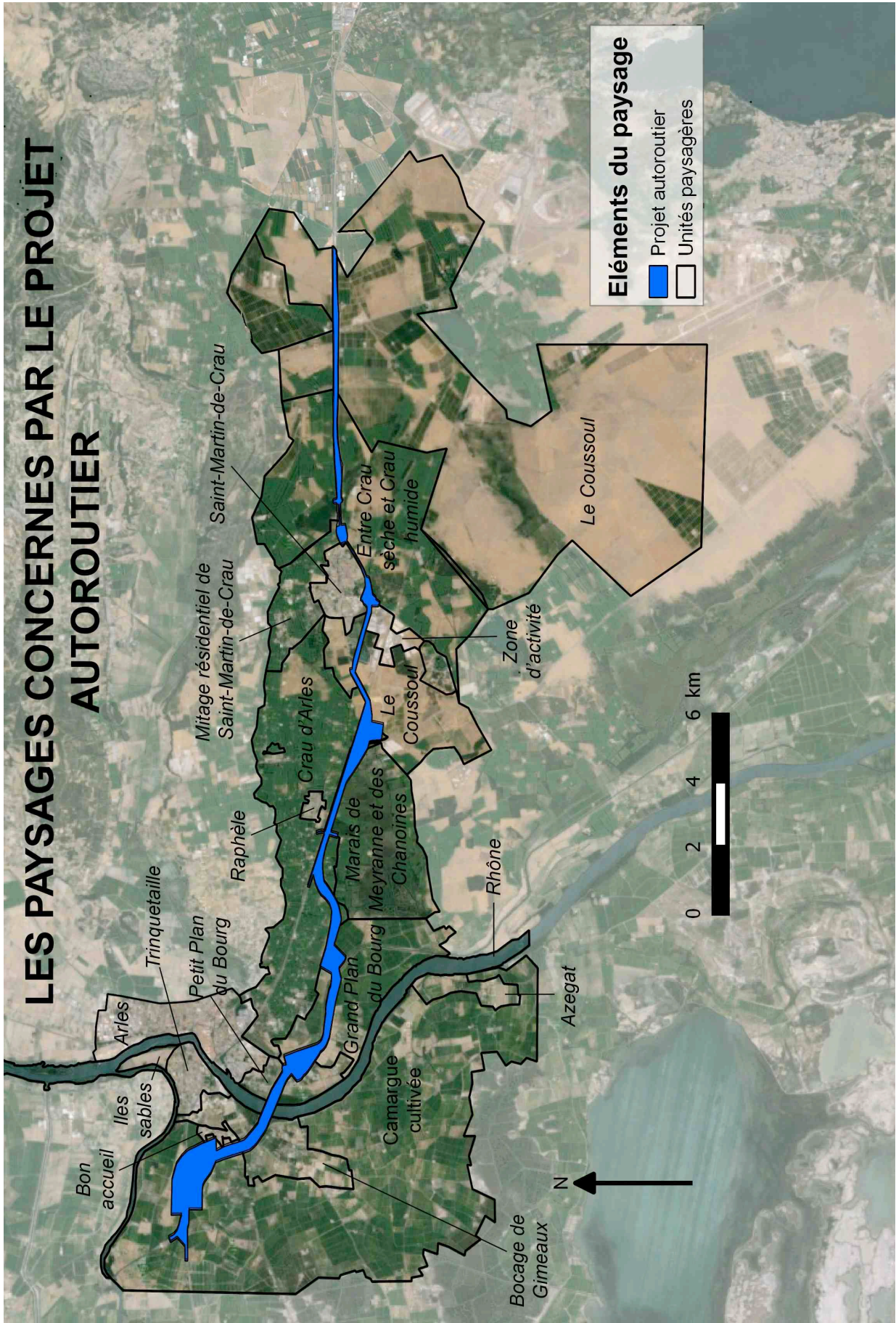
Annexe 6 Table de Bravais Pearson

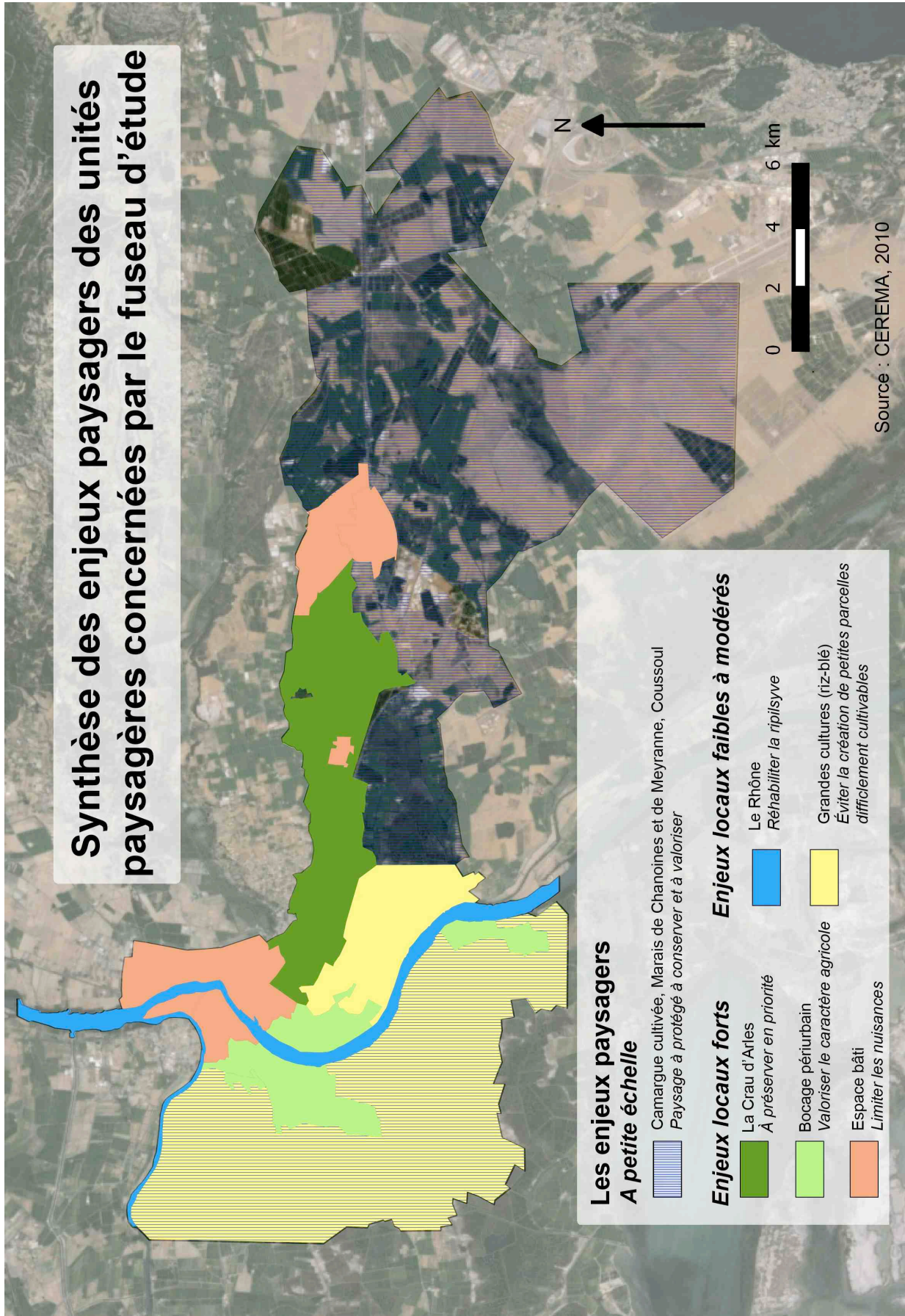
**Table des valeurs critiques du r de Bravais-Pearson
(Probabilités bilatérales)**

ddl	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,001	0,0001	0,00001
1	0,9512	0,9878	0,9971	0,9997	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
2	0,8002	0,9002	0,9502	0,9802	0,9902	0,9992	1,0000	1,0000
3	0,6872	0,8055	0,8785	0,9345	0,9589	0,9913	0,9982	0,9997
4	0,6085	0,7294	0,8116	0,8823	0,9173	0,9742	0,9920	0,9976
5	0,5510	0,6696	0,7546	0,8330	0,8747	0,9510	0,9807	0,9924
6	0,5069	0,6216	0,7069	0,7889	0,8345	0,9251	0,9657	0,9842
7	0,4717	0,5824	0,6665	0,7499	0,7978	0,8984	0,9482	0,9734
8	0,4429	0,5495	0,6320	0,7156	0,7647	0,8723	0,9295	0,9608
9	0,4188	0,5216	0,6022	0,6852	0,7349	0,8472	0,9104	0,9470
10	0,3982	0,4974	0,5761	0,6582	0,7080	0,8235	0,8913	0,9324
11	0,3804	0,4763	0,5531	0,6340	0,6837	0,8011	0,8726	0,9176
12	0,3647	0,4577	0,5326	0,6122	0,6615	0,7801	0,8545	0,9027
13	0,3508	0,4410	0,5141	0,5924	0,6413	0,7605	0,8370	0,8879
14	0,3384	0,4261	0,4975	0,5744	0,6227	0,7421	0,8203	0,8734
15	0,3273	0,4125	0,4823	0,5579	0,6057	0,7248	0,8043	0,8593
16	0,3171	0,4002	0,4684	0,5427	0,5899	0,7086	0,7890	0,8455
17	0,3079	0,3889	0,4557	0,5287	0,5752	0,6933	0,7744	0,8322
18	0,2994	0,3785	0,4439	0,5157	0,5616	0,6789	0,7604	0,8193
19	0,2915	0,3689	0,4330	0,5035	0,5489	0,6654	0,7471	0,8068
20	0,2843	0,3600	0,4229	0,4922	0,5369	0,6525	0,7344	0,7948
21	0,2776	0,3517	0,4134	0,4817	0,5258	0,6404	0,7223	0,7832
22	0,2713	0,3439	0,4045	0,4717	0,5153	0,6289	0,7107	0,7720
23	0,2654	0,3367	0,3962	0,4624	0,5053	0,6179	0,6996	0,7612
24	0,2599	0,3299	0,3884	0,4536	0,4960	0,6075	0,6889	0,7508
25	0,2547	0,3234	0,3810	0,4452	0,4871	0,5976	0,6787	0,7408
26	0,2499	0,3174	0,3740	0,4373	0,4787	0,5881	0,6689	0,7311
27	0,2453	0,3116	0,3674	0,4298	0,4707	0,5791	0,6596	0,7217
28	0,2409	0,3062	0,3612	0,4227	0,4630	0,5705	0,6505	0,7127
29	0,2368	0,3010	0,3552	0,4159	0,4558	0,5622	0,6418	0,7040
30	0,2328	0,2961	0,3495	0,4095	0,4488	0,5543	0,6335	0,6955
31	0,2291	0,2915	0,3441	0,4033	0,4422	0,5467	0,6254	0,6874
32	0,2255	0,2870	0,3389	0,3974	0,4359	0,5394	0,6177	0,6795
33	0,2221	0,2827	0,3340	0,3917	0,4298	0,5323	0,6102	0,6718
34	0,2189	0,2787	0,3293	0,3863	0,4240	0,5256	0,6029	0,6644
35	0,2157	0,2748	0,3247	0,3811	0,4184	0,5190	0,5960	0,6572
36	0,2128	0,2710	0,3204	0,3761	0,4130	0,5128	0,5892	0,6502
37	0,2099	0,2674	0,3162	0,3713	0,4078	0,5067	0,5827	0,6435
38	0,2071	0,2640	0,3122	0,3667	0,4028	0,5009	0,5763	0,6369
39	0,2045	0,2606	0,3083	0,3622	0,3980	0,4952	0,5702	0,6306
40	0,2019	0,2574	0,3045	0,3579	0,3933	0,4897	0,5642	0,6244
50	0,1808	0,2308	0,2734	0,3219	0,3543	0,4434	0,5134	0,5708
60	0,1651	0,2110	0,2502	0,2950	0,3250	0,4080	0,4740	0,5289
70	0,1530	0,1955	0,2320	0,2738	0,3019	0,3799	0,4425	0,4949
80	0,1431	0,1831	0,2173	0,2567	0,2831	0,3570	0,4165	0,4666
90	0,1350	0,1727	0,2051	0,2424	0,2674	0,3377	0,3946	0,4427
100	0,1281	0,1639	0,1948	0,2302	0,2541	0,3212	0,3758	0,4221
200	0,0907	0,1162	0,1382	0,1637	0,1810	0,2300	0,2705	0,3054
300	0,0741	0,0950	0,1130	0,1340	0,1482	0,1886	0,2222	0,2513
400	0,0642	0,0823	0,0980	0,1161	0,1285	0,1637	0,1930	0,2185
500	0,0574	0,0736	0,0877	0,1040	0,1150	0,1466	0,1729	0,1959
1000	0,0407	0,0521	0,0621	0,0736	0,0815	0,1040	0,1227	0,1392

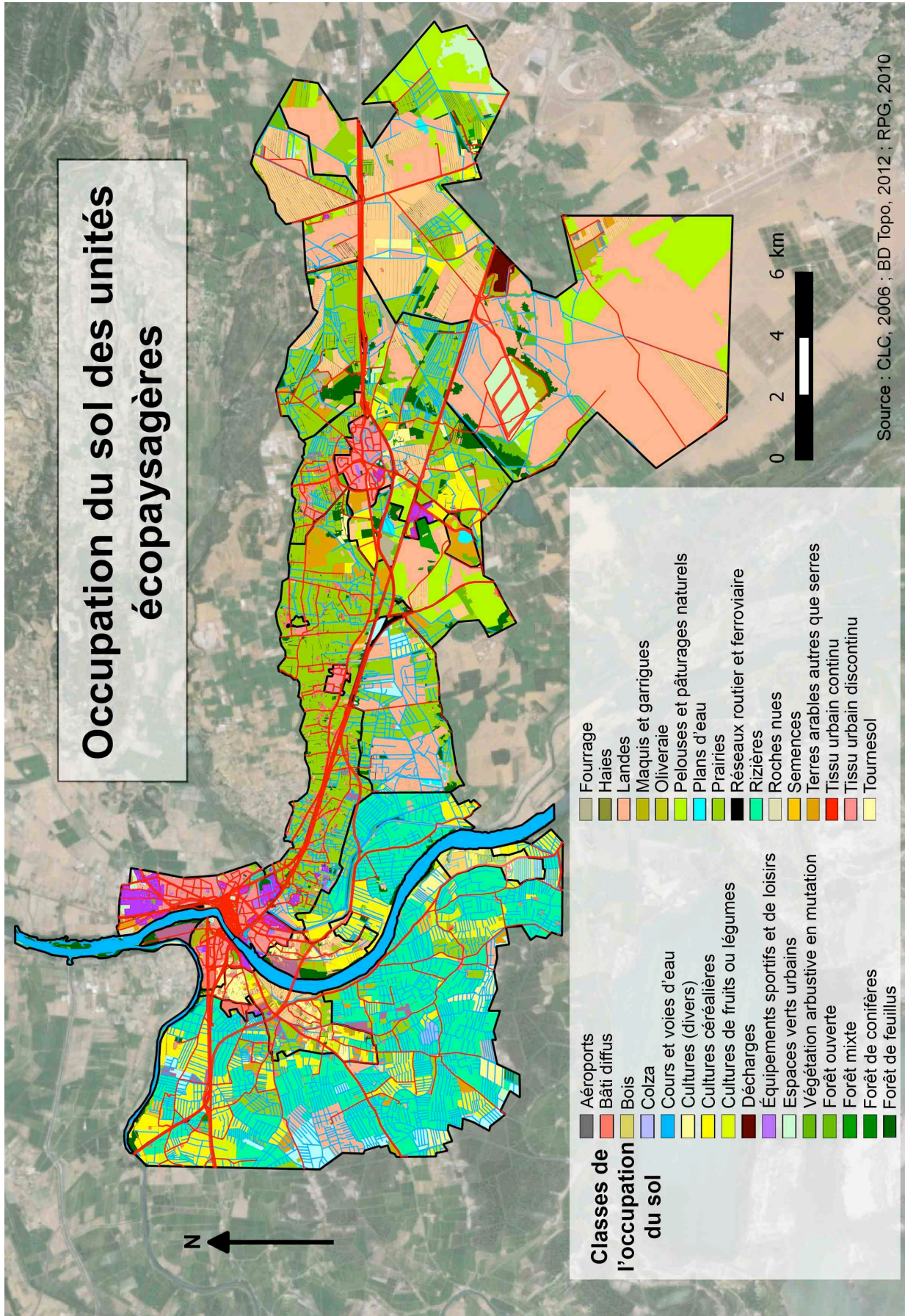
Atlas cartographique

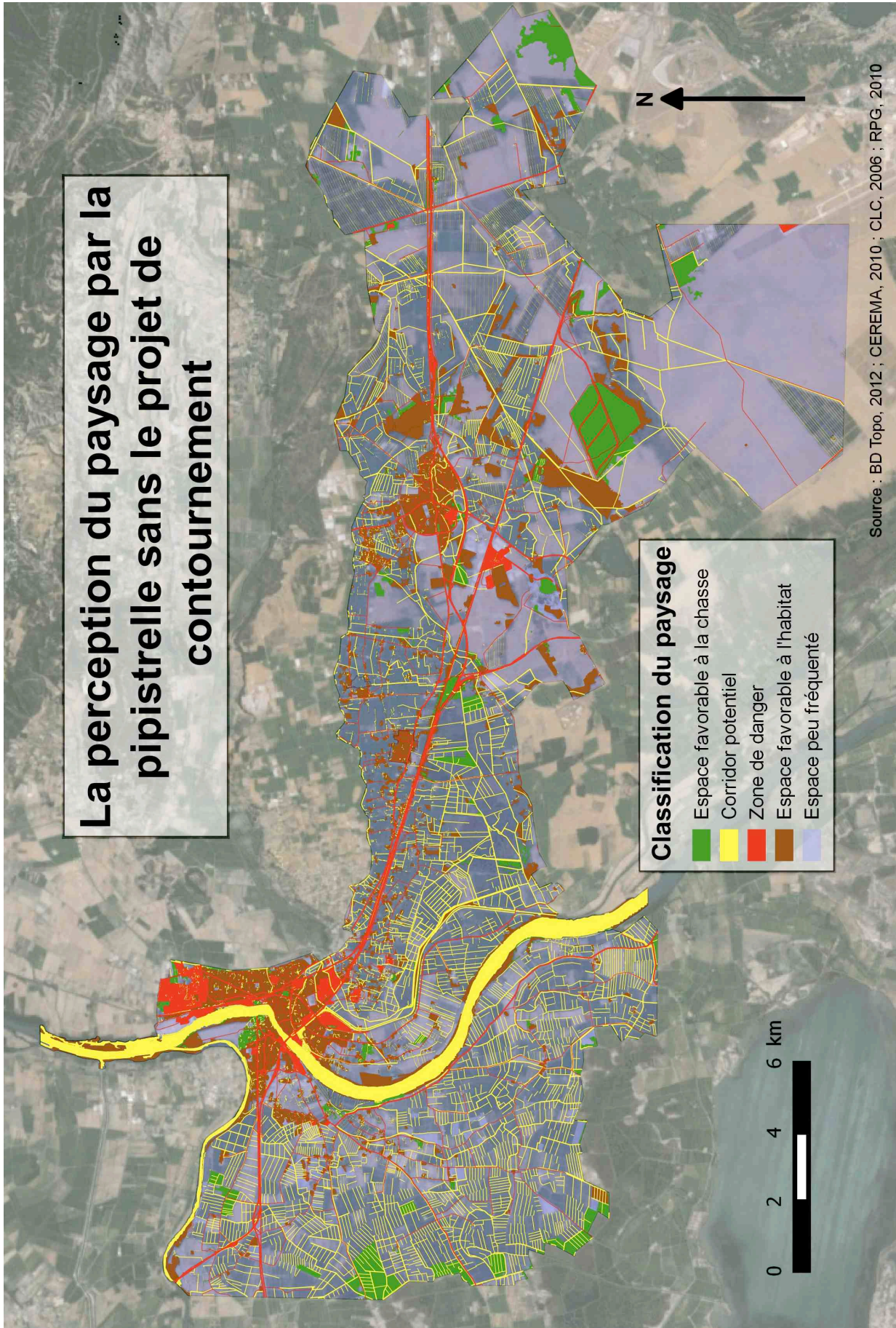


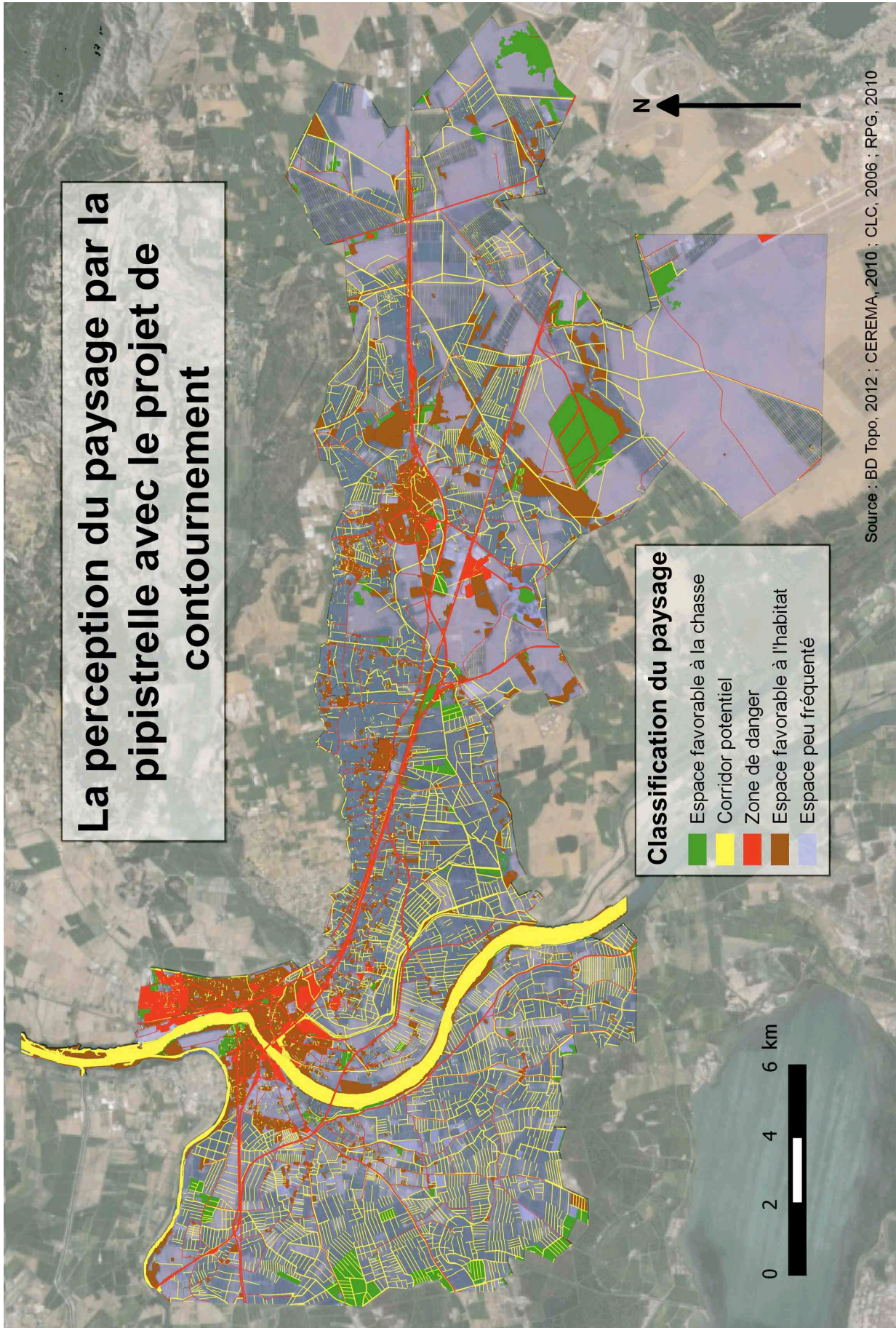


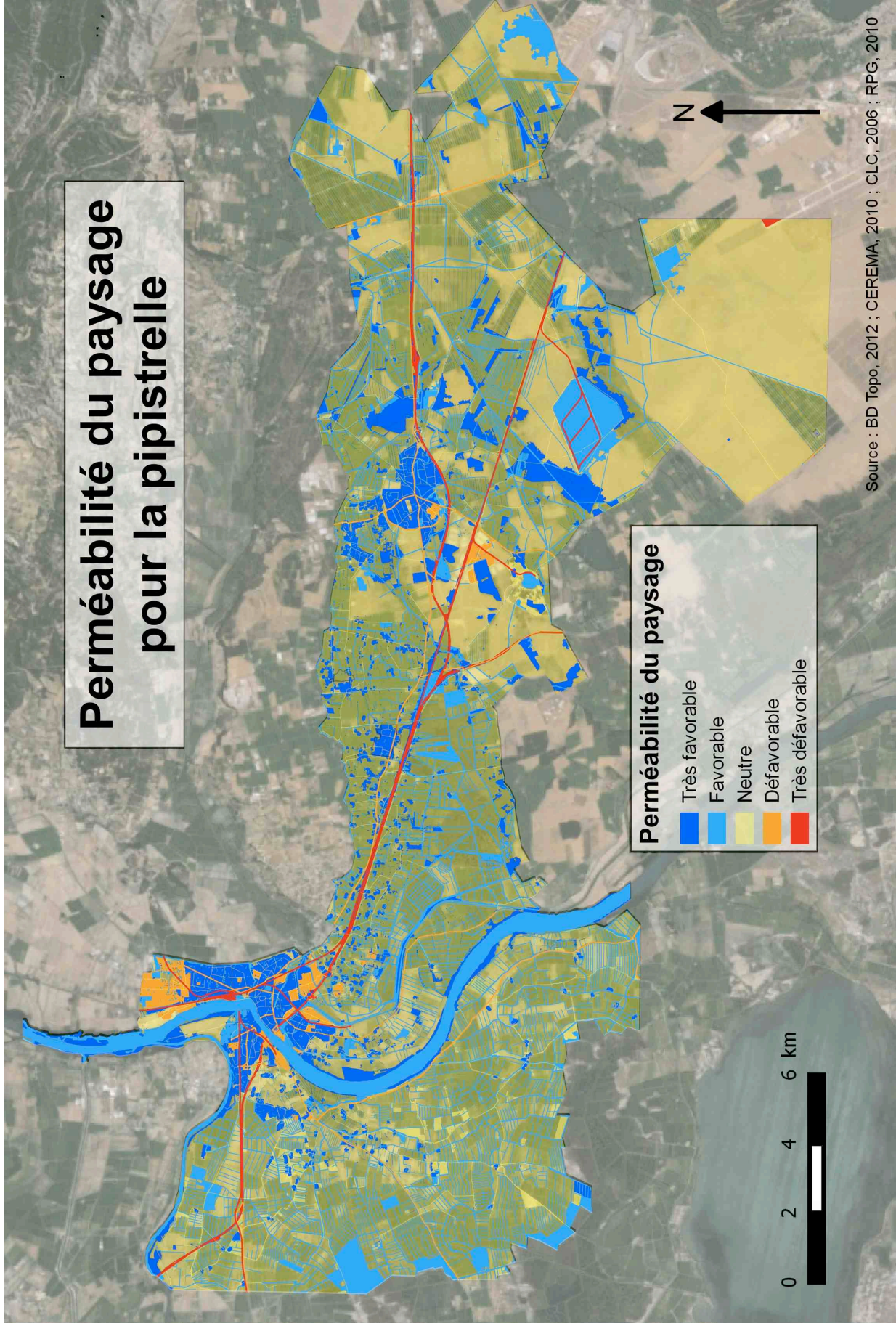


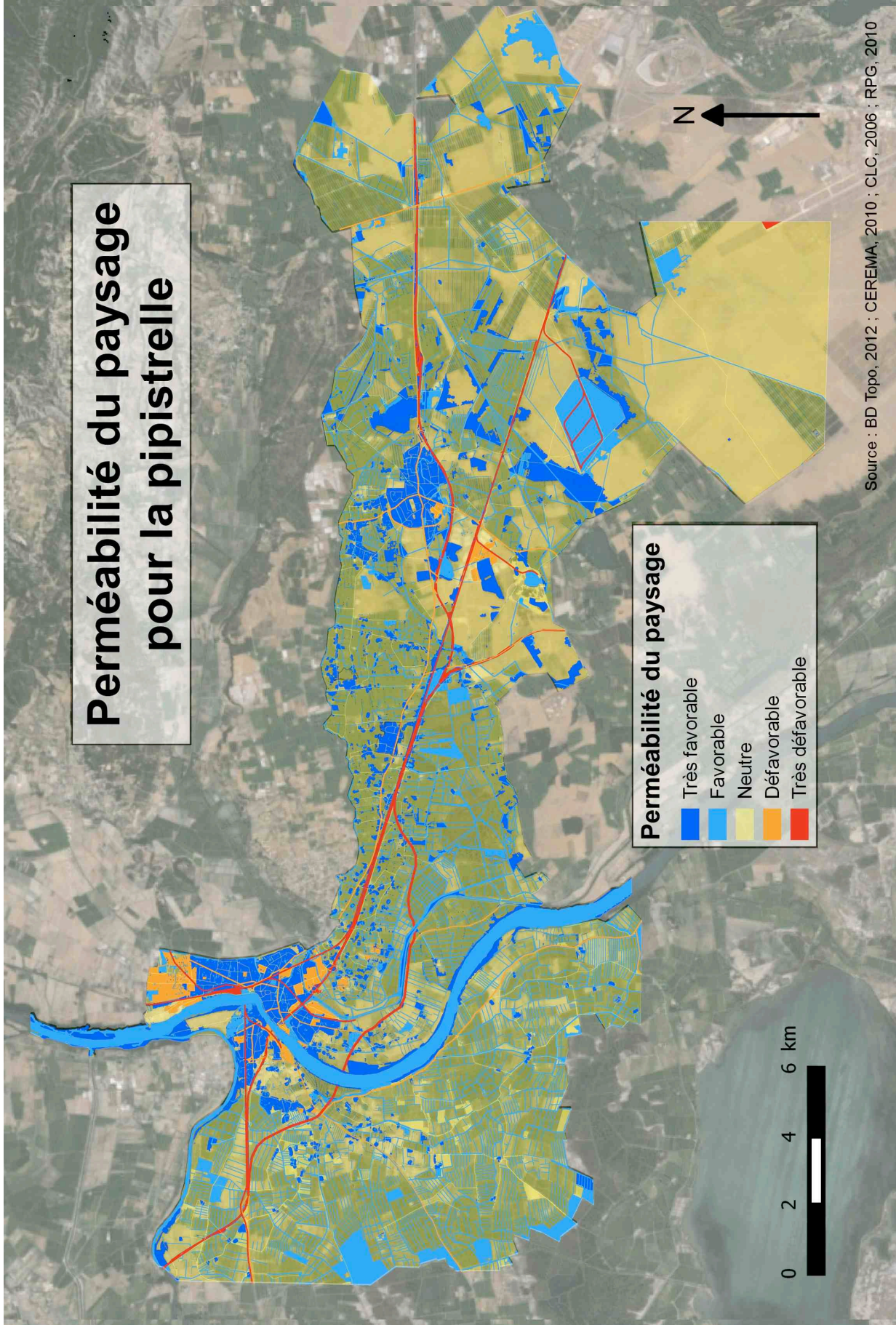


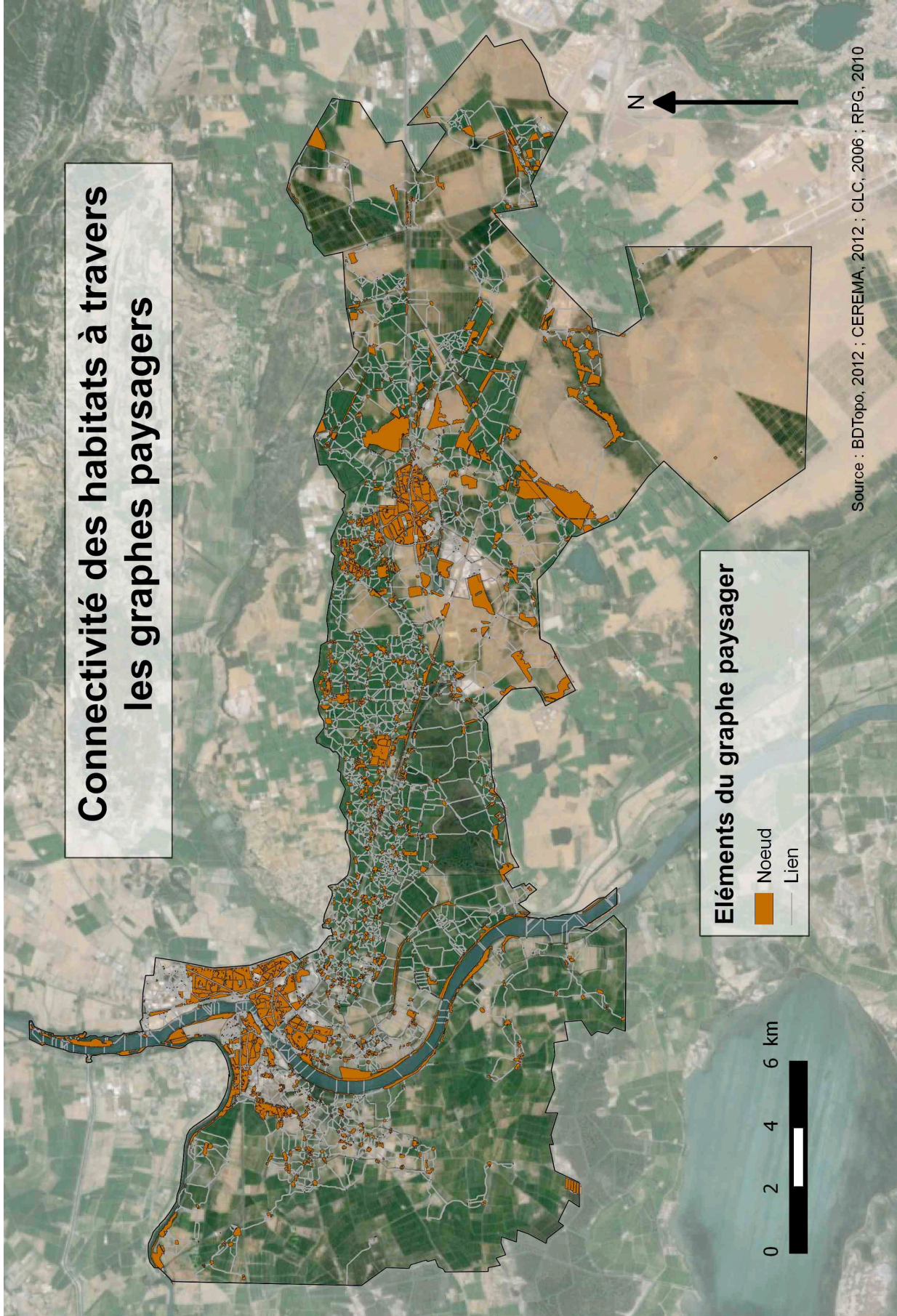


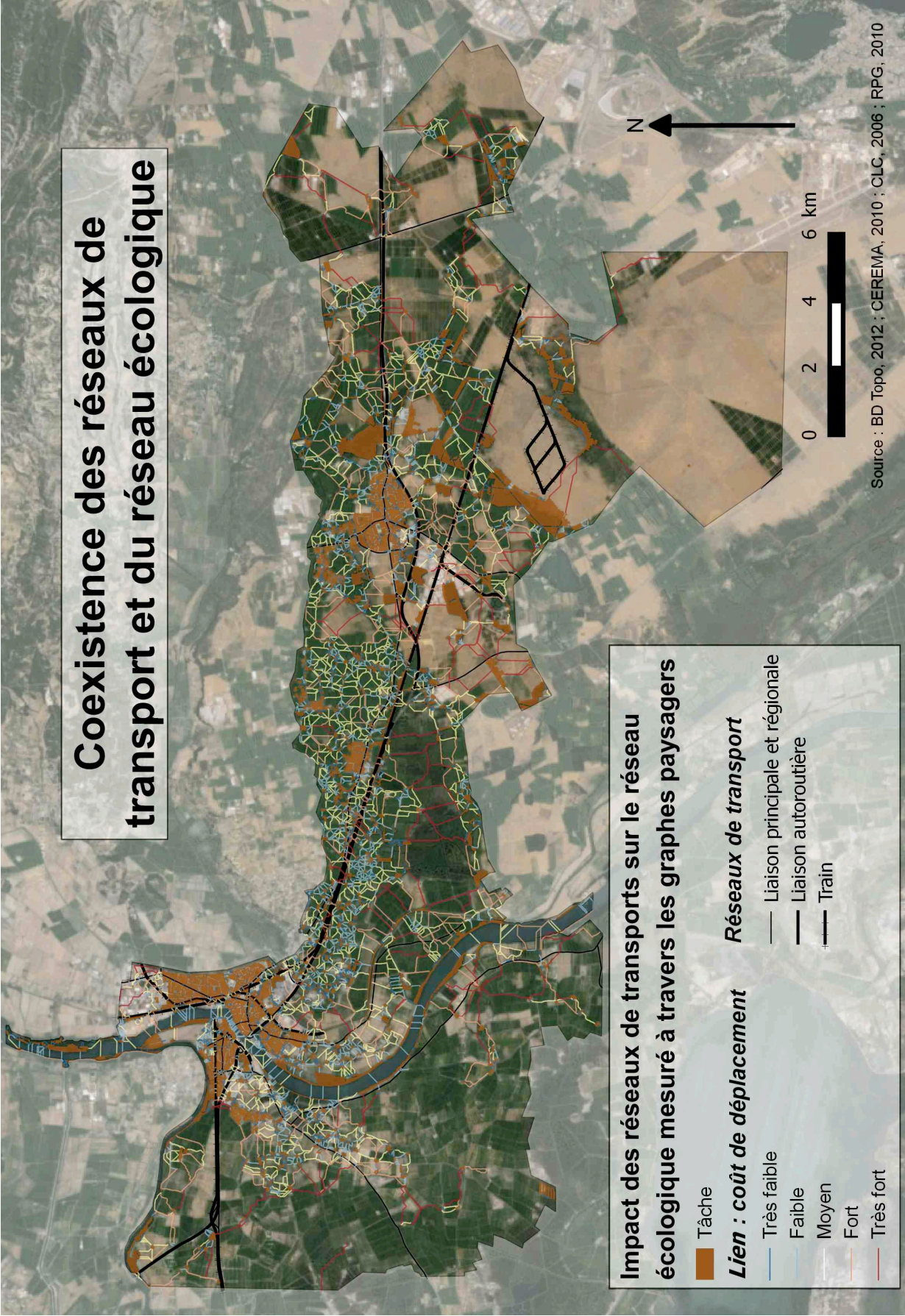


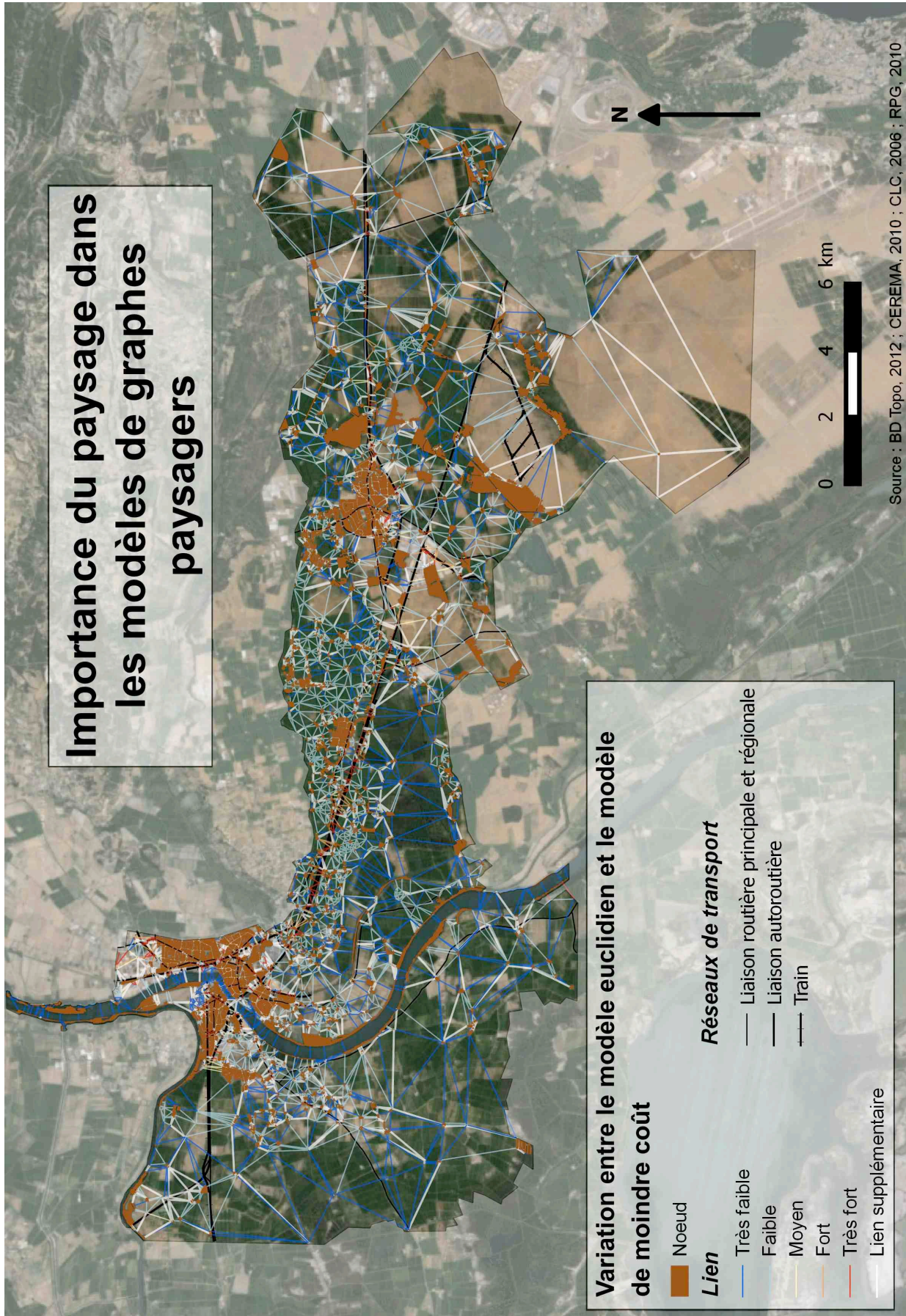


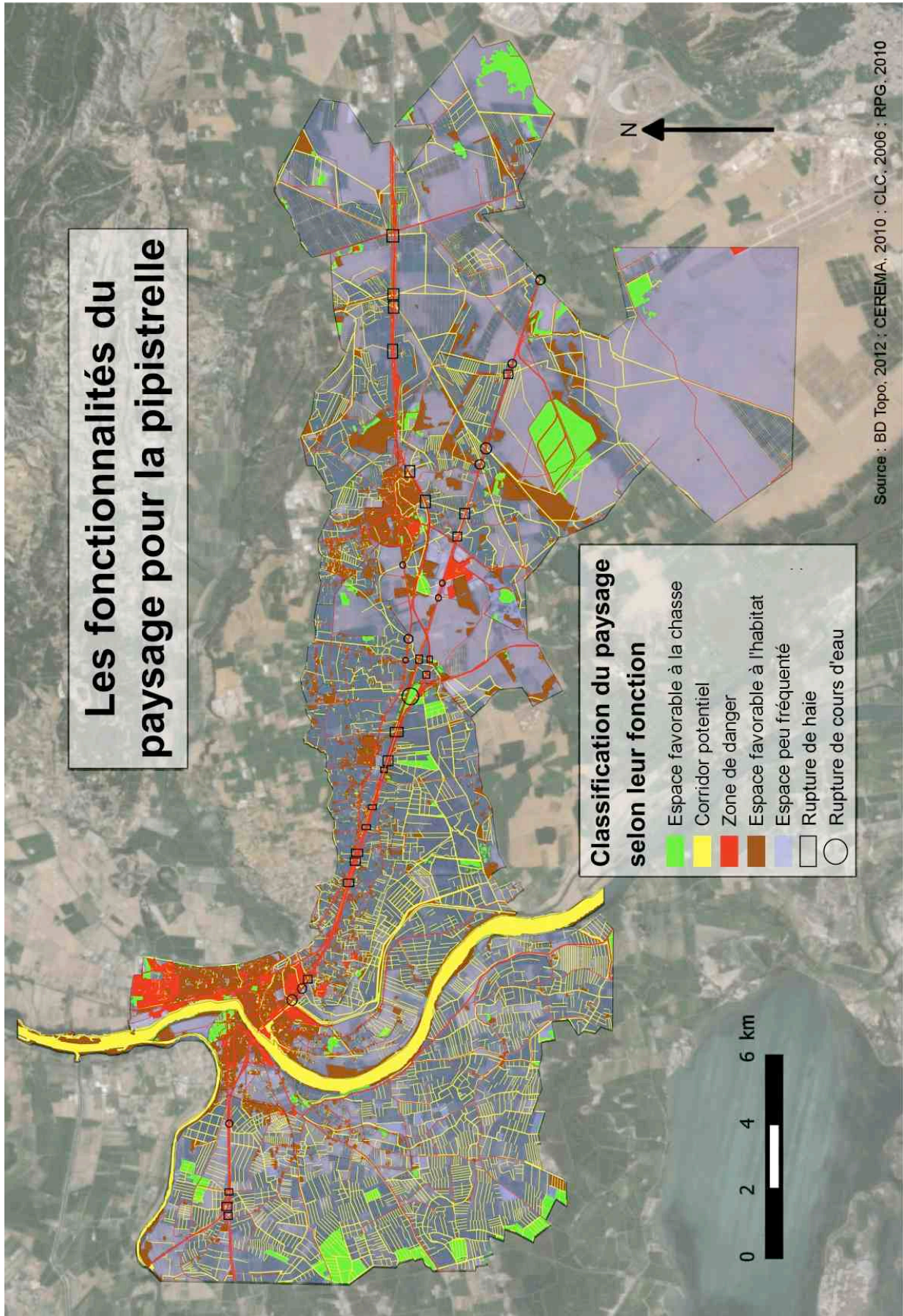


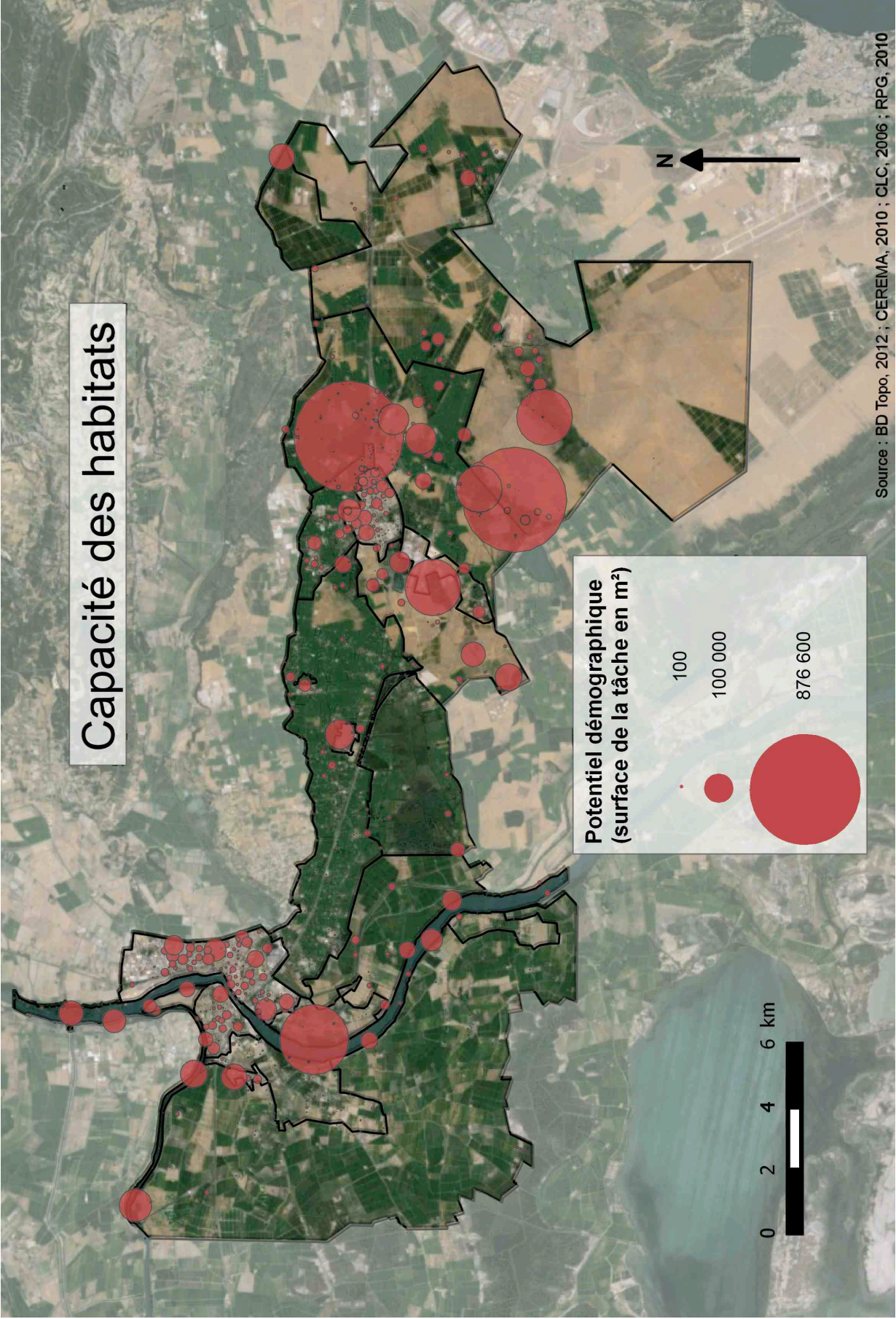


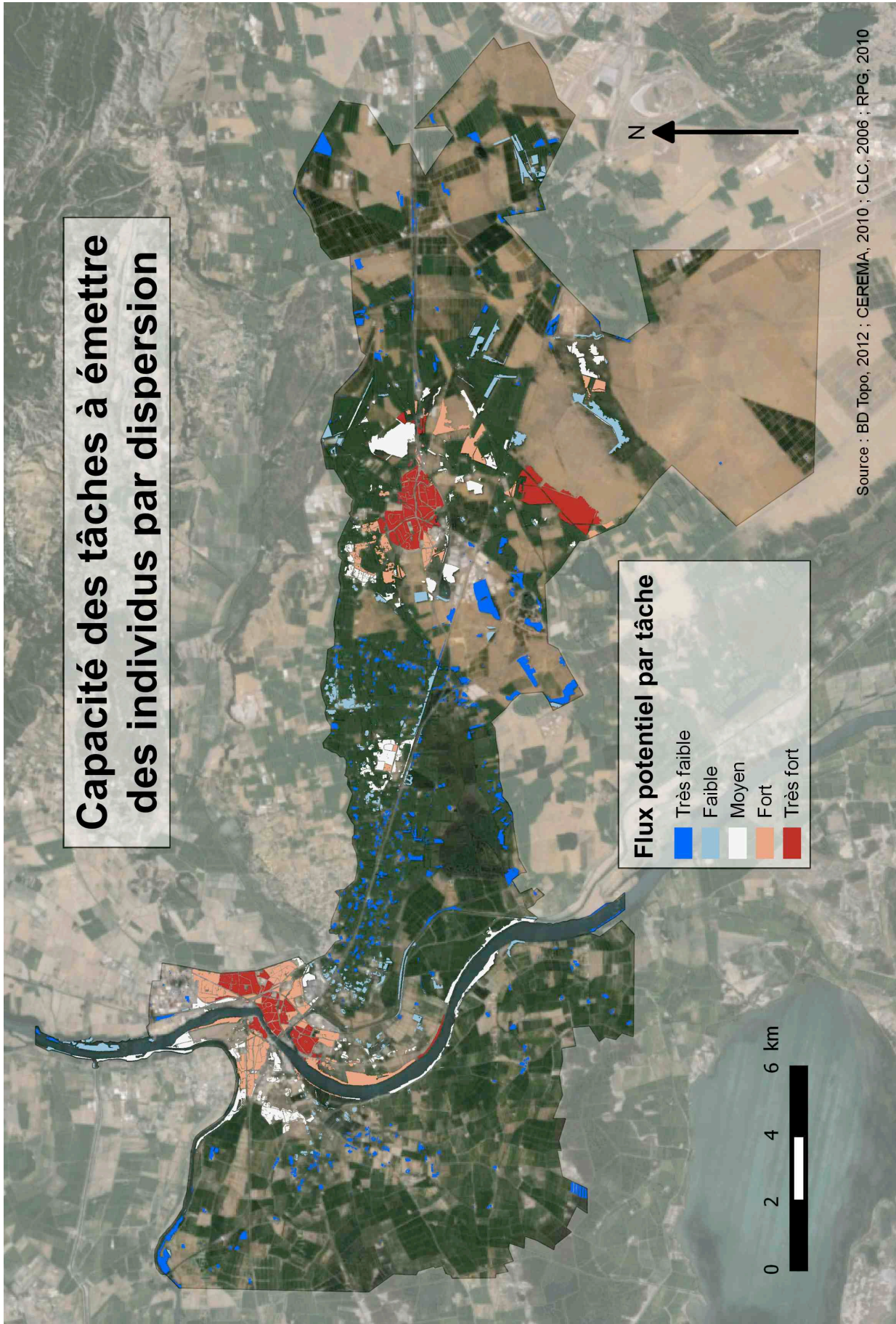


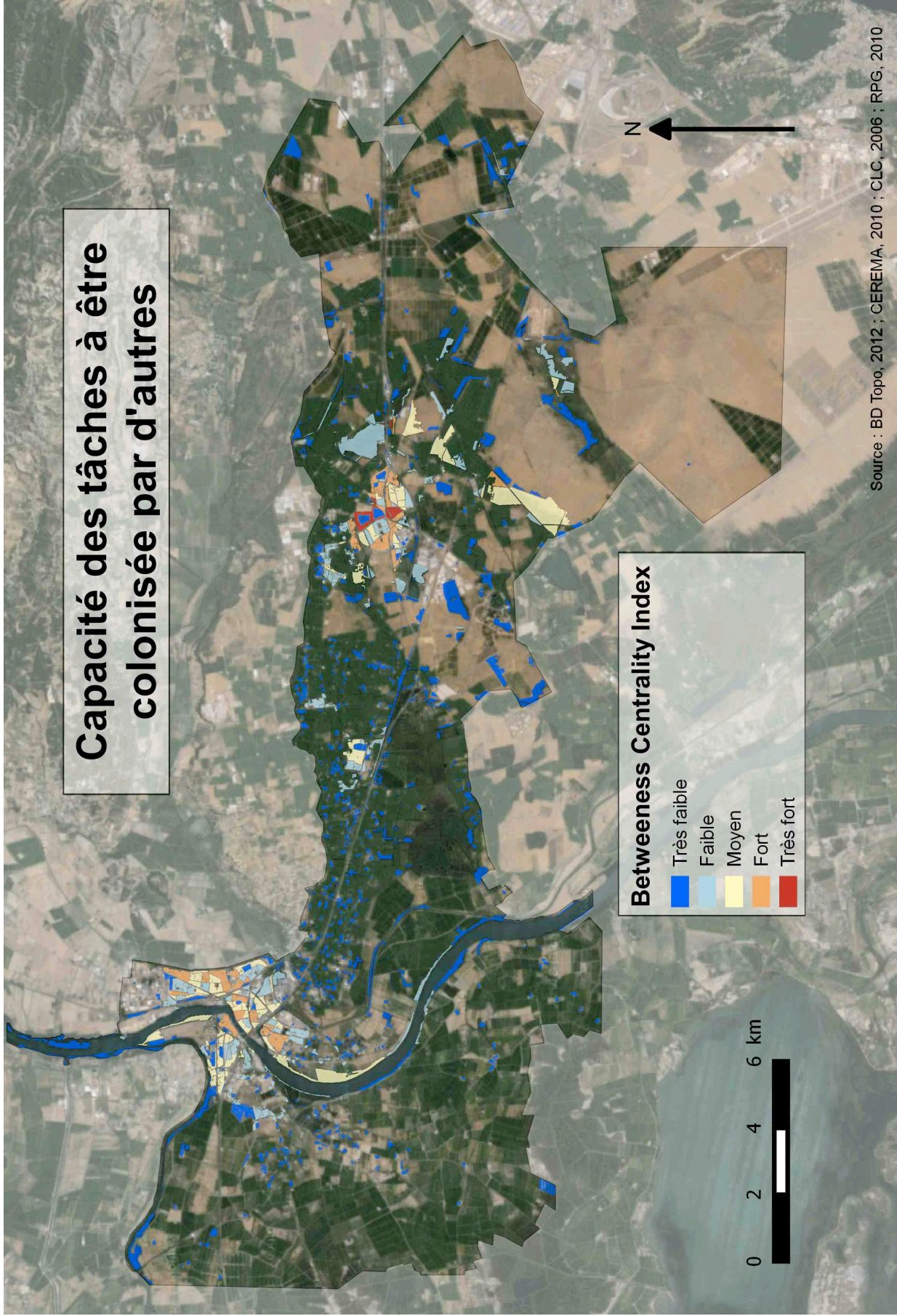


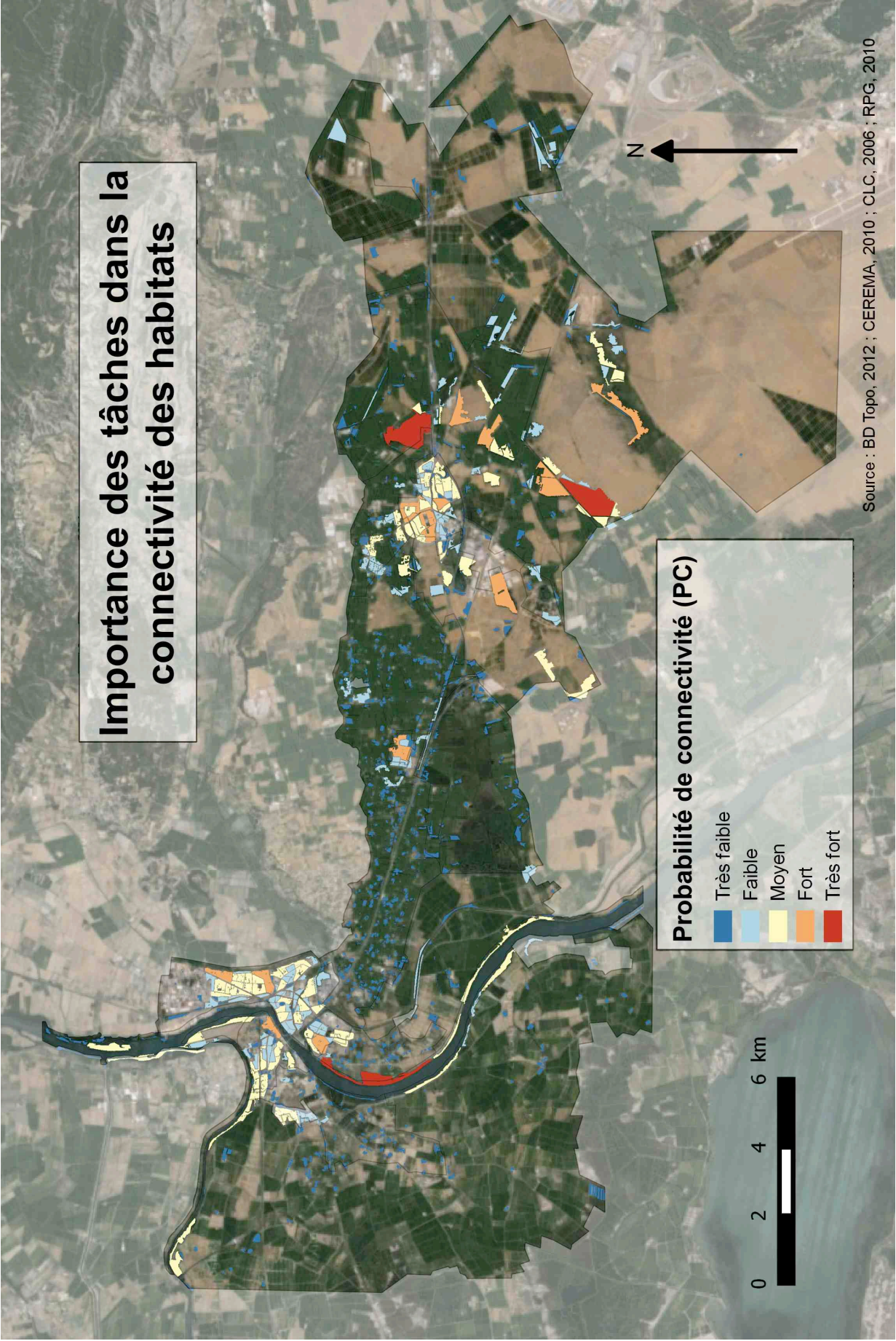


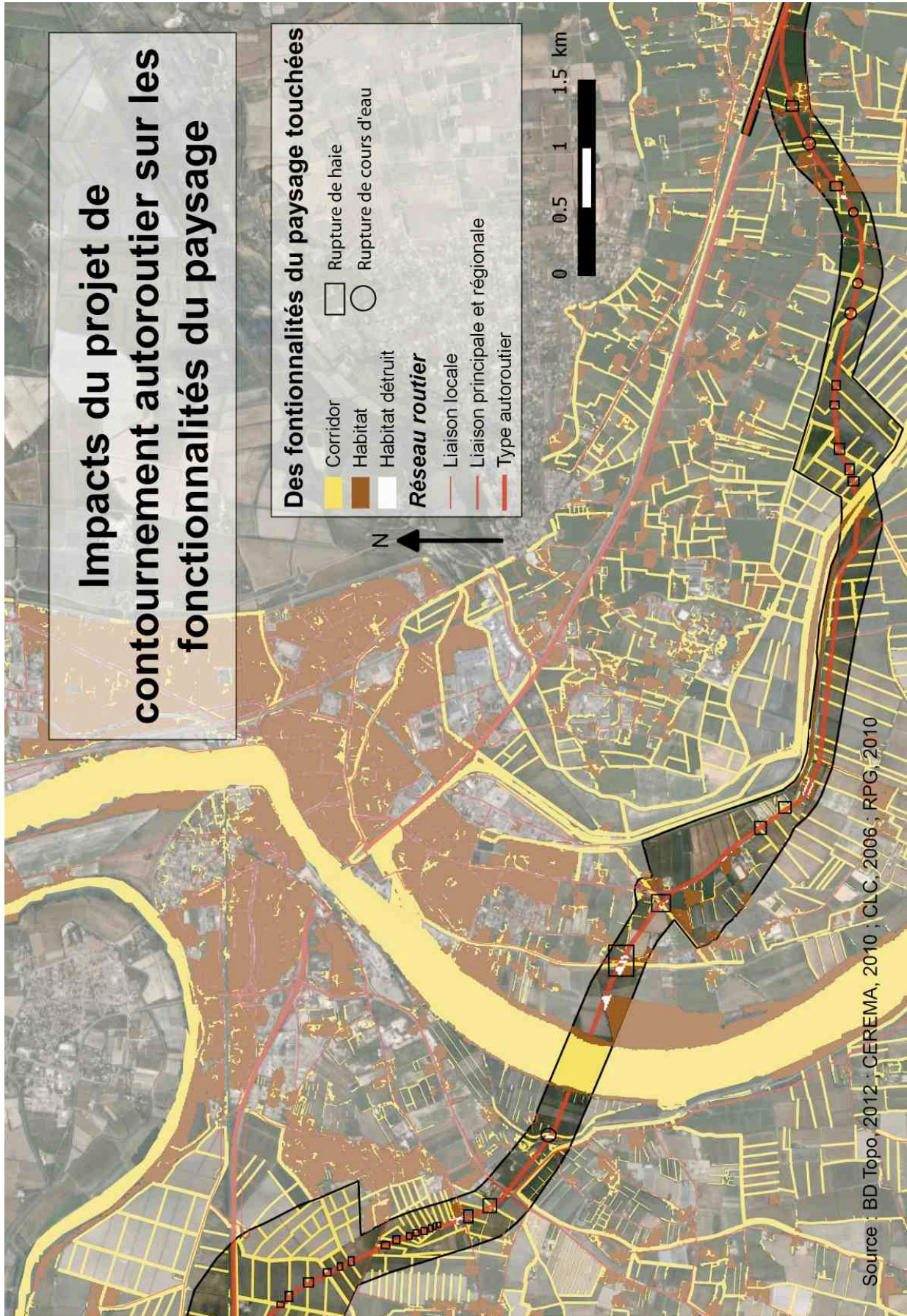


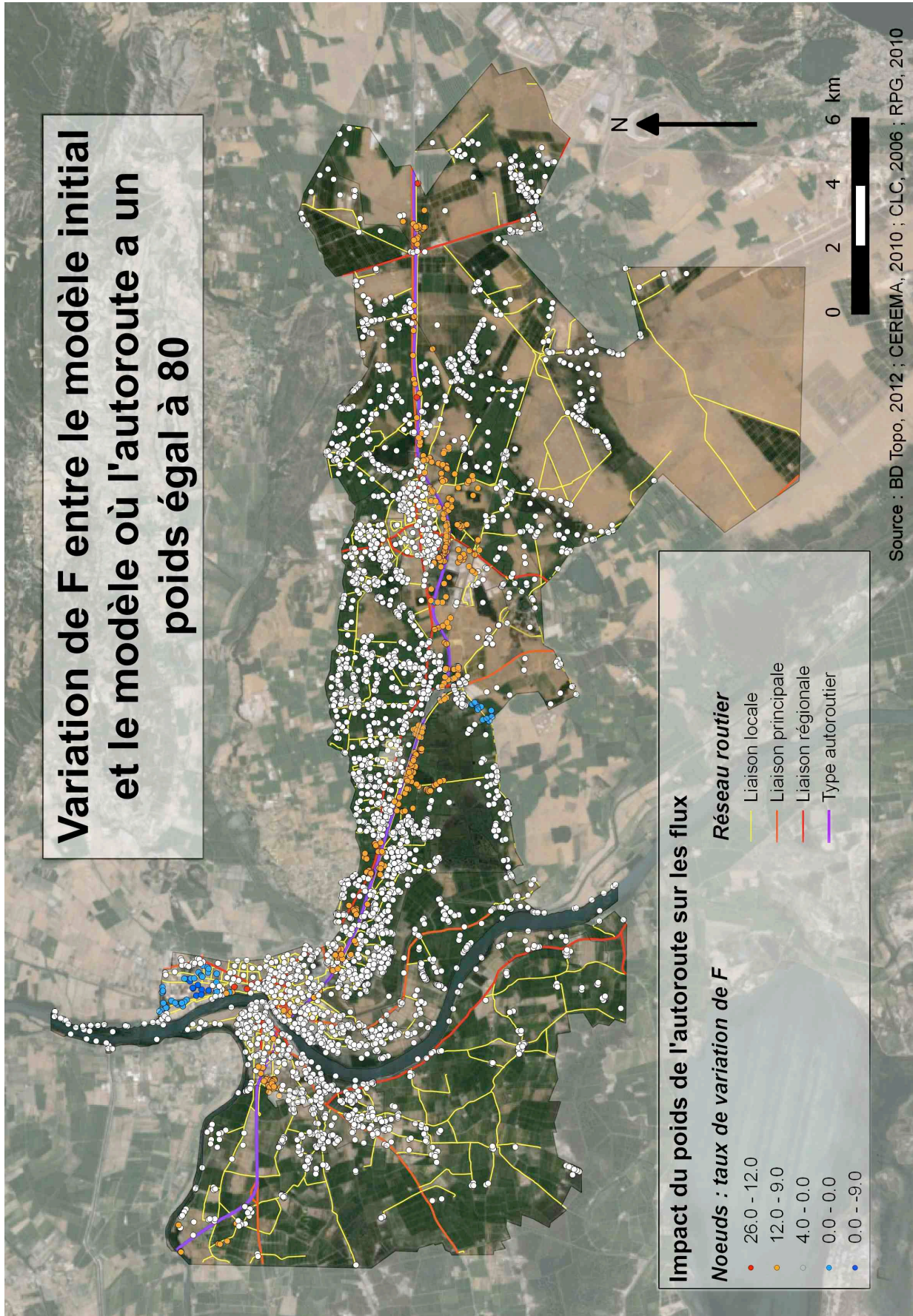












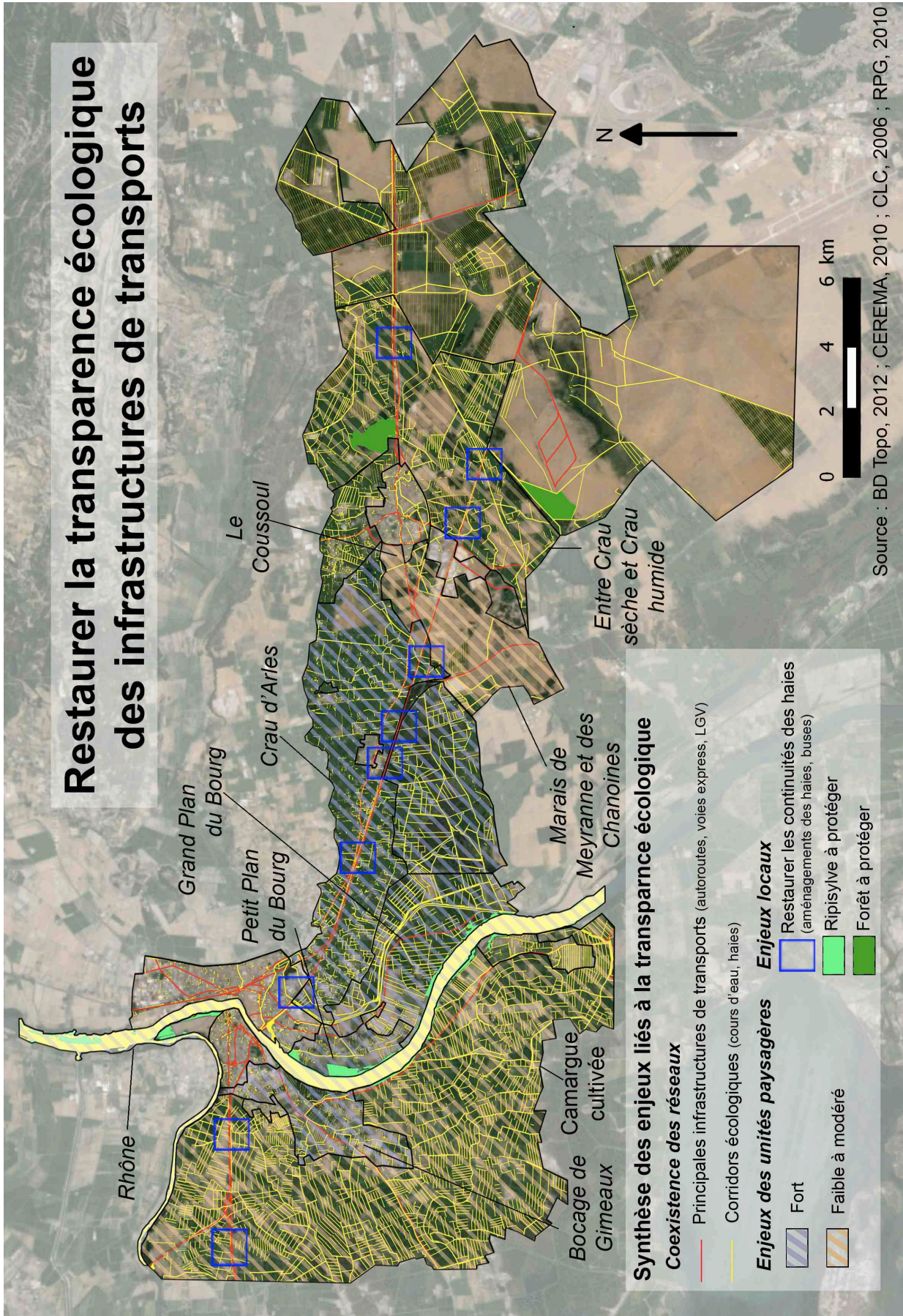


Table des illustrations

Annexes

Annexe 1 Les unités paysagères de la Camargue en 2007 (source : DDE & DIREN, 2007)...	144
Annexe 2 Les unités paysagères de la Crau en 2007 (DDE & DIREN, 2007).....	145
Annexe 3 Intensification des activités agricoles en Camargue.....	146
Annexe 4 Étalement urbain de la ville d'Arles	147
Annexe 5 Images satellites : apparition de la portion de l'A54 entre Salon de Provence et Saint-Martin-de-Crau.....	149
Annexe 6 Table de Bravais Pearson	150

Cartes

Carte 1 Situation du projet de contournement autoroutier et des jumelages	40
Carte 2 Les unités écopaysagères concernées.....	53
Carte 3 Synthèse des enjeux paysagers.....	60
Carte 4 Localisation de la pipistrelle aux abords de la RN113 en 2012	64
Carte 5 Occupation du sol du terrain d'étude	72
Carte 6 La perception du paysage de la pipistrelle avant le projet de contournement d'Arles ...	76
Carte 7 La perception du paysage de la pipistrelle après le projet de contournement d'Arles ...	76
Carte 8 La perméabilité du paysage pour la pipistrelle avant le projet de contournement d'Arles	79
Carte 9 La perméabilité de paysage pour la pipistrelle après le projet de contournement d'Arles	79

Carte 10 Connectivité des habitats à travers les graphes paysagers	87
Carte 11 Un réseau écologique largement impacté par les réseaux de transport.....	93
Carte 12 Les unités paysagères	94
Carte 13 Importance du paysage dans les modèles de graphes paysagers.....	96
Carte 14 Des fonctionnalités paysagères amputées	97
Carte 15 Capacité des habitats	101
Carte 16 Capacité des tâches à émettre des flux par dispersion	102
Carte 17 Capacité des tâches à être colonisée par d'autres	103
Carte 18 Importance des tâches dans la connectivité des habitats mesurés à travers la métrique PC.....	107
Carte 19 Impacts du projet de contournement sur les fonctionnalités	110
Carte 20 Variation de F entre le modèle initial et le modèle où l'autoroute a un poids égal à 80	114
Carte 21 Synthèse : restaurer la transparence écologique des infrastructures de transport	117

Figures

Figure 1 Relation entre les changements liés à la biodiversité et les impacts socio-économiques	14
Figure 2 Évolution du réseau autoroutier en France entre 1970 et 2010	23
Figure 3 Réseau écologique défini dans le cadre de la Stratégie paneuropéenne pour la diversité biologique et paysagère, d'après CEREMA, EX-CETE, GERBEAUD MAULIN F. & LONG M. (2008).....	31
Figure 4 Réseau écologique défini par le bureau d'études ECONAT (source : Econat & Conseil général de l'Isère, 2001)	32

Figure 5 Exemples d'impacts de la fragmentation sur les habitats, d'après Fahrig L. (2003)....	35
Figure 6 Enrichissement de la base de donnée occupation du sol	71
Figure 7 Rastérisation d'une image vectorielle	81
Figure 8 Graphe planaire VS graphe complet.....	83
Figure 9 Détournement de haie.....	99
Figure 10 Niveaux de calcul des métriques de connectivité.....	100
Figure 11 Exemple de formes qui peuvent impacter BC	104
Figure 12 Cohabiter avec les chauves souris (source : La dépêche de Garenne, GEPMA, 2011)	128

Graphiques

Graphique 1 hiérarchisation des mesures d'évitement, d'atténuation et de compensation (Source : CEREMA, ex-Sétra et al., 2011)	21
Graphique 2 Variation de F entre le modèle initial et le modèle où le poids de l'autoroute est égal à 80	113

Photographies

Photo 1 Image aérienne du jumelage de l'A54 et de la RN113	41
Photo 2 Image aérienne du jumelage de la RN113 et de la voie ferrée	41
Photo 3 Vaste étendue sèche du Coussoul vue depuis la RN113 (Source : GoogleStreetView, 2013)	54
Photo 4 Herbages et haies de cyprès (Source : CEREMA, ex-CETE Méditerranée 2012).....	54
Photo 5 Vue depuis la RD27 : résidence à gauche, herbages à droite (Source : GoogleStreetView, 2013)	55

Photo 6 Écopôle (Source : CEREMA, ex-CETE méditerranée, 2012).....	55
Photo 7 Vastes parcelles et mas vues depuis la RN113 (Source : GoogleStreetView, 2013)	56
Photo 8 Remontée de la nappe phréatique dans les canaux de drainage (Source : CEREMA, 2012)	56
Photo 9 Champs de blé au sud de la tour d'Aling (Source : CEREMA, 2012).....	57
Photo 10 Vignoble du mas Saint Vincent (Source : CEREMA, 2012)	57
Photo 11 Le Rhône vu depuis le pont de la RN113 d'Arles (Source : GoogleStreetView, 2013)	58
Photo 12 Verger et canal d'irrigation à l'est de la RD570 (Source : CEREMA, 2012)	58
Photo 13 Quartier résidentiel de Bon Accueil (Source : GoogleStreetView, 2013).....	58
Photo 14 Rizières et roselières au nord du mas Angeline (Source : CEREMA, 2012)	59
Photo 15 Pipistrelle Pygmée (Source : INPN ; Réal. : L. Arthur)	63
Photo 16 Pipistrelle commune (<i>Pipistrellus pipistrellus</i>) Réal. L. Arthur	68
Photo 17 Passage à faune simple : buse.....	98

Tableaux

Tableau 1 Les grandes procédures réglementaires nationales et internationales.....	19
Tableau 2 Exemples de services écosystémiques	29
Tableau 3 Enjeux des espèces présentes sur le terrain d'étude d'après BIOTOPE (2012).....	63
Tableau 4 Occupation du sol des unités écopaysagères (Source : CLC, 2006 ; BD Topo, 2012 ; RPG, 2010)	73
Tableau 5 Classification de l'occupation du sol	75
Tableau 6 Classification du paysage tenant compte des vocations des réseaux de transports ...	78

Tableau 7 Classes paysagères et résistances associées pour la pipistrelle..... 85

Tableau 8 Comparaison des métriques globales sans et avec le projet de contournement..... 108

Liste des acronymes

ACP	Analyse en Composante Principale
ARPE	Agence Régionale Pour l'Environnement
BC	Betweenness Centrality
CEREMA	Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CERTU	Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques
CETE	Centre d'Études Techniques du Ministère de l'Équipement
CETMEF	Centre d'Études Techniques, Maritimes et Fluviales
CGDD	Commissariat Général au Développement Durable
CLC	Corine Land Cover
DDE	Direction Départementale de l'Équipement
DIREN	Direction Régionale de l'Environnement
FAO	Food and Agriculture Organization
F	Flux potentiels
GCP	Groupe Chiroptères de Provence
GEPMA	Groupe d'Étude et de Protection des Mammifères d'Alsace
GLCF	Global Land Cover Facility
IFN	Inventaire Forestier National
IGN	Institut nationale de l'information géographique et forestière
INPN	Inventaire National du Patrimoine Naturel

ITTECOP	Infrastructures de Transports Terrestres, Écosystèmes et Paysages
LGV	Ligne à Grande Vitesse
LPO	Ligue pour la Protection des Oiseaux
MSC	Mean Size of Components
OFN	Office National des Forêts
ONU	Organisation des Nations Unies
PC	Probabilité de connectivité
PLU	Plan Local d'Urbanisme
R	Recrutement
RPG	Recensement Parcellaire Graphique
SCOT	Schéma de Cohérence Territoriale
SETRA	Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
SILENE	Services d'Information et de Localisation des Espèces Natives et Envahissantes
SNB	Stratégie Nationale pour la Biodiversité
SNIT	Schéma National d'Infrastructures de Transport
SRCE	Schéma Régionale de Cohérence Écologique

Paul Rodrigues

paul.rodrigues@etu.univ-provence.fr

paul.rodrigues@hotmail.fr

Tél. : 06 70 84 60 44

UMR 7300 ESPACE - CNRS, équipe d'Aix-Marseille

Aix-Marseille Université, Centre Schumann, Aix-Marseille

29 avenue Robert Schumann,

13621 Aix-en-Provence cedex I



Tel : 04 42 95 38 53

Fax : 04 42 95 38 80



Résumé

La théorie des graphes pour analyser la transparence écologique des infrastructures de transport

Ce dernier siècle a été synonyme d'un important accroissement des besoins économiques et sociaux dans le monde. Afin de trouver une certaine prospérité, ce rapide développement a eu de lourdes conséquences sur l'environnement et la biodiversité. C'est ainsi que, depuis les années 70, les réglementations politiques et les avancées scientifiques se sont multipliées avec pour maître mot : le développement durable. Plus précisément, les infrastructures routières sont les premières responsables de la fragmentation des habitats, phénomène qui peut avoir d'importants effets sur la biodiversité. Aujourd'hui, faire coexister les réseaux de transport et les réseaux écologiques est un enjeu incontournable et c'est à travers ces multiples constats que l'analyse de la transparence écologique des infrastructures de transport a montré son intérêt.

Les portions routières entre Salon-de-Provence et Arles (A 54, RN 113 et LGV notamment) présentent des enjeux économiques et sociaux d'une part et des enjeux environnementaux liés à la biodiversité d'autre part. De plus, depuis quelques années, un projet de contournement de la ville d'Arles est prévu et augmenterait, une fois de plus, l'empreinte humaine sur l'environnement. Par ailleurs, les chiroptères, protégés au niveau national et international présentent de forts enjeux sur ce terrain d'étude. En fonction des caractéristiques de l'espèce et de l'espace, un modèle basé sur la théorie des graphes est mis en place et permet de calculer différentes métriques de connectivité.

Ainsi, les enjeux spatiaux sont identifiés grâce à une analyse approfondie des indicateurs de connectivité. Différentes propositions d'aménagements du territoire sont émises afin de restaurer les continuités écologiques. Il semblerait que l'installation de buse couplé à un détournement ou une implantation de haies pourrait favoriser la transparence écologique des infrastructures de transport.

Mots clés : écologie du paysage / fragmentation / connectivité écologique / corridor écologique / transparence écologique / services écosystémiques / théorie des graphes